



TUGAS AKHIR - TE141599

**STUDI *FERRORESONANCE* AKIBAT SAMBARAN PETIR
PADA *CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER* (CVT)
SALURAN TRANSMISI 500 KV**

Novandi Wijayanto
NRP 2213106072

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc
IGN Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE141599

**STUDY OF FERRORESONANCE AT CAPACITIVE
VOLTAGE TRANSFORMER (CVT) CAUSED LIGHTNING
IN 500 KV TRANSMISSION LINE**

Novandi Wijayanto
NRP 2213106072

Advisor
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc
IGN Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**STUDI FERRORESONANCE AKIBAT SAMBARAN PETIR
PADA CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER (CVT)
SALURAN TRANSMISI 500 KV**

TUGAS AKHIR


**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr. Ing. I Made Yulistya N, S.T., M.Sc
NIP. 197007121998021001


IGN Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.
NIP. 197301232002121001

**SURABAYA
JANUARI, 2016**

**JURUSAN
TEKNIK ELEKTRO**

**STUDI *FERRORESONANCE* AKIBAT SAMBARAN PETIR
PADA *CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER* (CVT)
SALURAN TRANSMISI 500 KV**

Nama : Novandi Wijayanto
Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST, M.Sc
Pembimbing II : IGN Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.

ABSTRAK

Kemunculan *ferroresonance* pada suatu sistem kelistrikan khususnya *Capacitive Voltage Transformer* (CVT) dapat disebabkan oleh sambaran petir. Fenomena ini dapat menyebabkan tegangan lebih dan arus lebih CVT. Perangkat lunak yang digunakan pada studi ini adalah ATP/EMTP. Parameter yang diteliti meliputi variasi amplitudo impuls petir dan durasi impuls petir yang meliputi variasi durasi waktu muka (ts) dan waktu punggung (tr) terhadap tegangan puncak dan arus puncak pada CVT. Dari hasil simulasi diperoleh tegangan puncak mencapai 267,5% terhadap tegangan puncak normal dan arus puncak mencapai 266,1% dari arus normal pada primer.

Kata kunci : Ferroresonance, CVT, petir

STUDY OF FERRORESONANCE AT CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER (CVT) CAUSED BY LIGHTNING IN 500 KV TRANSMISSION LINE

Name : Novandi Wijayanto
1st Advisor : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST, M.Sc
2nd Advisor : IGN Satriyadi Hernanda, S.T., M.T.

ABSTRACT

The occurrence of ferroresonance on an electrical system in particular Capacitive Voltage Transformer (CVT) can be caused by a lightning strike. This phenomenon can lead to overvoltage and overcurrent. The software used to simulation ferroresonance is ATP/EMTP . Parameters studied are variations of lightning impulse amplitude and the lightning impulse duration include variations of front time duration (t_s) and back time duration (t_r) to the peak voltage and peak current in the CVT . The simulation results show that peak voltage reached 267.5 % from normal peak voltage and the peak current reaches 266,1 % from normal current on the primary .

Keywords : Ferroresonance, CVT, lightning

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT dengan segala rahmat, karunia, petunjuk, serta kekuatan yang berlimpah tak terkira yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

STUDI FERRORESONANCE AKIBAT SAMBARAN PETIR PADA CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER (CVT) PADA SALURAN TRANSMISI 500 KV

Tugas Akhir ini ditujukan untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan Studi Strata-1 di Jurusan Teknik Elektro, ITS Surabaya. Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tentunya juga tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu dengan segala hormat, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dosen pembimbing, Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc. dan IGN Satriyadi Hernanda, S.T., M.T. atas segala ilmu dan kesabaran dalam membimbing penulis hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Bapak Sugeng Mulyono dan Ibu Semiyatun, sebagai Ayah dan Ibu tercinta yang sudah memberikan kasih sayang yang luar biasa kepada penulis.
3. Teman-teman Lintas Jalur Genap 2013 dan kos Kejawan Gebang 27 yang telah banyak membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari dan memohon maaf atas segala kekurangan pada Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di kemudian hari.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

	Hal.
HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	2
 BAB II PERALATAN TEGANGAN TINGGI DAN PETIR	
2.1 Saluran Transmisi	3
2.2 Transformator Tegangan	5
2.2.1 Transformator Tegangan Magnetik (Induktif)	5
2.2.2 Transformator Tegangan Kapasitif	7
2.3 Fenomena Petir	8
2.3.1 Pembentukan Badai	8
2.3.2 Peluahan Petir	9
2.3.3 Jenis-Jenis Petir	10
2.4 Feroresonansi	12
2.4.1 Pengertian Feroresonansi	12
2.4.2 Klasifikasi Feroresonansi	13
 BAB III PEMODELAN CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER (CVT) DAN PETIR	
3.1 <i>Capacitive Voltage Transformer</i>	17
3.2 Rangkaian Ekuivalen	20
3.3 Komponen Utama CVT	21
3.4 Pemodelan Petir	22

BAB IV ANALISA HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA *CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER*

4.1	Simulasi Feroresonansi	23
4.2	Analisa Hasil Simulasi	25
4.2.1	Keadaan Normal	25
4.2.2	Feroresonansi Akibat Petir.....	27
4.2.2.1	Analisa Tegangan Lebih	27
4.2.2.2	Analisa Arus Lebih.....	39

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran.....	49

DAFTAR PUSTAKA	51
-----------------------------	-----------

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Diagram garis sistem tenaga listrik	3
Gambar 2.2 Rangkaian kumparan tambahan trafo kutup tunggal ..	6
Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen trafo tegangan kapasitif	7
Gambar 2.4 Pembentukan sel sebuah badai	9
Gambar 2.5 Skematik perkembangan stepped leader dan pengangkap peluahan sebuah petir awan-bumi	10
Gambar 2.6 Bentuk tipikal arus impuls	11
Gambar 2.7 Petir awan-bumi negatif berantai	11
Gambar 2.8 Mode fundamental	13
Gambar 2.9 Mode subharmonik	14
Gambar 2.10 Mode quasi-periodik	14
Gambar 2.11 Mode chaotic	15
Gambar 3.1 <i>Capacitive voltage transformer</i>	17
Gambar 3.2 Konstruksi trafo tegangan kapasitif	19
Gambar 3.3 Contoh name plate CVT 500 kV merk AREVA	20
Gambar 3.4 Rangkaian ekivalen CVT	20
Gambar 3.5 Komponen utama CVT	21
Gambar 4.1 Layout tipikal gardu induk 500 kV	23
Gambar 4.2 Rangkaian simulasi	24
Gambar 4.3 Kurva magnetisasi CVT	25
Gambar 4.4 Respon tegangan primer saat tersambar petir	26
Gambar 4.5 Tegangan primer CVT normal	27
Gambar 4.6 Tegangan sekunder CVT normal	28
Gambar 4.7 Respon tegangan pada primer ketika saluran transmisi tersambar petir	29
Gambar 4.8 Respon tegangan pada sekunder ketika saluran transmisi tersambar petir	29
Gambar 4.9 Respon tegangan pada primer saat amplitudo impuls petir 12 kA	30
Gambar 4.10 Respon tegangan pada primer saat amplitudo impuls petir 2 kA	31
Gambar 4.11 Grafik tegangan puncak terhadap amplitudo impuls petir pada primer	33
Gambar 4.12 Grafik tegangan puncak terhadap amplitudo impuls petir pada sekunder	33

Gambar 4.13	Respon tegangan pada primer saat durasi impuls petir 1,2/80 μ s	34
Gambar 4.14	Respon tegangan pada primer saat durasi impuls petir 1,2/5 μ s	34
Gambar 4.15	Grafik tegangan puncak terhadap durasi waktu punggung impuls petir pada primer	36
Gambar 4.16	Grafik tegangan puncak terhadap durasi waktu punggung impuls petir pada sekunder	36
Gambar 4.17	Grafik tegangan puncak terhadap durasi waktu muka impuls petir pada primer	38
Gambar 4.18	Grafik tegangan puncak terhadap durasi waktu muka impuls petir pada sekunder	38
Gambar 4.19	Respon arus pada primer ketika saluran transmisi tersambar petir	39
Gambar 4.20	Respon arus pada sekunder ketika saluran transmisi tersambar petir	39
Gambar 4.21	Respon arus saat amplitudo impuls petir 12 kA	40
Gambar 4.22	Respon arus saat amplitudo impuls petir 2 kA	41
Gambar 4.23	Grafik arus puncak terhadap amplitudo impuls petir pada primer	42
Gambar 4.24	Grafik arus puncak terhadap amplitudo impuls petir pada sekunder	43
Gambar 4.25	Respon arus pada primer saat durasi impuls petir 1,2/80 μ s	44
Gambar 4.26	Respon arus pada primer saat durasi impuls petir 1,2/5 μ s	44
Gambar 4.27	Grafik arus puncak terhadap durasi waktu punggung impuls petir pada primer	46
Gambar 4.28	Grafik arus puncak terhadap durasi waktu punggung impuls petir pada sekunder	46
Gambar 4.29	Grafik arus puncak terhadap durasi waktu muka impuls petir pada primer	48
Gambar 4.30	Grafik arus puncak terhadap durasi waktu muka impuls petir pada sekunder	48

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 4.1 Pengaruh nilai kapasitor CVT terhadap feroresonansi pada primer	26
Tabel 4.2 Perbandingan amplitudo impuls petir terhadap tegangan puncak primer	31
Tabel 4.3 Perbandingan amplitudo impuls petir terhadap tegangan puncak sekunder.....	32
Tabel 4.4 Perbandingan durasi waktu punggung impuls petir terhadap tegangan puncak primer.....	35
Tabel 4.5 Perbandingan durasi waktu punggung impuls petir terhadap tegangan puncak sekunder	35
Tabel 4.6 Perbandingan durasi waktu muka impuls petir terhadap tegangan puncak primer.....	37
Tabel 4.7 Perbandingan durasi waktu muka impuls petir terhadap tegangan puncak sekunder	37
Tabel 4.8 Perbandingan amplitudo impuls petir terhadap arus puncak primer	41
Tabel 4.9 Perbandingan amplitudo impuls petir terhadap arus puncak sekunder	42
Tabel 4.10 Perbandingan durasi waktu punggung impuls petir terhadap arus puncak primer	45
Tabel 4.11 Perbandingan durasi waktu punggung impuls petir terhadap arus puncak sekunder.....	45
Tabel 4.12 Perbandingan durasi waktu muka impuls petir terhadap arus puncak primer	47
Tabel 4.13 Perbandingan durasi waktu muka impuls petir terhadap arus puncak sekunder.....	47



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Voltage transformer atau transformator tegangan adalah transformator satu fasa step-down yang mengubah tegangan sistem ke suatu tegangan rendah yang digunakan untuk perlengkapan indikator, alat ukur, rele, dan alat sikronisasi. Hal ini diperlukan atas pertimbangan harga dan bahaya yang ditimbulkan tegangan tinggi bagi operator. Transformator tegangan dapat dibedakan menjadi 2 yaitu *inductive voltage transformer* dan *capasitive voltage transformer* (CVT). Pada CVT terdapat pembagi tegangan kapasitif yang diselipkan suatu trafo penengah (*intermediate transformer*) yang merupakan induktor non-linier. Rangkaian ini membentuk suatu rangkaian tertutup yang berpotensi menimbulkan gejala feroresonansi (*ferroresonance*)[1].

Gejala feroresonansi merupakan kejadian saturasi non linier. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya tegangan lebih dan arus lebih yang cukup besar dan menghasilkan panas yang tak diinginkan[2]. Penyebab utama dari fenomena ini adalah munculnya lebih dari satu respon *steady state* yang stabil pada parameter jaringan yang sama. Salah satunya adalah gejala transien[3]. Petir merupakan fenomena alam yang tak bisa dihindari. Sambaran petir memberikan arus impuls yang besar sehingga mampu memicu gejala transien[4].

Dari penjelasan diatas, diperlukan suatu studi tentang fenomena feroresonansi pada CVT akibat sambaran petir. Permasalahan yang timbul adalah untuk mempelajari dan mengetahui fenomena feroresonansi pada CVT serta bagaimana memodelkannya pada suatu simulasi. Sehingga akan diperoleh apa pengaruh yang ditimbulkan oleh fenomena feroresonansi pada CVT yang diakibatkan oleh petir.

Pada studi ini, penelitian difokuskan pada CVT yang terletak setelah *lighting arrester* dan sebelum transformator daya. Objek yang diteliti merupakan CVT pada salah satu fasa di gardu induk yang memiliki tegangan kerja 500 kV. Terjadi transien akibat sambaran petir pada kawat fasa saluran transmisi didekat CVT. Penelitian ini akan disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak ATPD/EMTP. Sehingga nantinya akan tampak dampak dari feroresonansi melalui tegangan puncak, arus lebih dan pada kondisi seperti apa yang berpotensi menimbulkan feroresonansi.

1.2 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan masing-masing bab diuraikan sebagai berikut :

BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, serta manfaat dan relevansi

BAB 2 berisi peralatan tegangan tinggi dan petir yang membahas tentang sistem tenaga listrik , trafo tegangan, petir dan feroresonansi.

BAB 3 berisi tentang pemodelan feroresonansi pada CVT akibat sambaran petir.

BAB 4 berisi tentang hasil simulasi yang telah dilakukan dan analisis mengenai hasil simulasi tersebut.

BAB 5 berisi tentang kesimpulan dan saran-saran dari proses pemodelan, simulasi, dan analisis mengenai feroresonansi

BAB II

PERALATAN TEGANGAN TINGGI DAN PETIR

2.1 Sistem Transmisi [1]

Sistem transmisi adalah suatu sistem penyaluran energi listrik dari satu tempat ke tempat lain, seperti dari stasiun pembangkit ke substation (gardu induk). Pemakaian sistem transmisi didasarkan atas besarnya daya yang harus disalurkan dari pusat-pusat pembangkit ke pusat beban dan jarak penyaluran yang cukup jauh antara sistem pembangkit dengan pusat beban tersebut. Sistem transmisi menyalurkan daya dengan tegangan tinggi yang digunakan untuk mengurangi adanya rugi-rugi akibat jatuh tegangan. Sistem transmisi dapat dibedakan menjadi sistem transmisi tegangan tinggi (*high voltage*, HV), sistem transmisi tegangan ekstra tinggi (*extra high voltage*, EHV), dan sistem transmisi ultra tinggi (*Ultra high voltage*, UHV).



Gambar 2.1 Diagram garis sistem tenaga listrik

Besarnya tegangan nominal saluran transmisi tegangan tinggi ataupun ekstra tinggi berbeda-beda untuk setiap negara atau perusahaan listrik di negara tersebut, tergantung kepada kemajuan tekniknya masing-masing. Secara umum klasifikasi tegangan tinggi adalah sebagai berikut [3].

- 1 Tegangan Tinggi (*High Voltage*), yaitu tegangan sistem : 110 kV, 132 kV, 156 kV, dan 220 kV di Eropa; 115 kV, 138 kV, 161 kV, dan 230 kV di Amerika; 150 kV di Indonesia.
- 2 Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage*), yaitu tegangan sistem : 275 kV, 380 kV, 400 kV, dan 800 kV di Eropa; 287 kV, 345 kV, 500 kV, dan 765 kV di Amerika; 500 kV di Indonesia.
- 3 Tegangan Ultra Tinggi (*Ultra High Voltage*), yaitu tegangan sistem diatas 1000 kV.

Transmisi dalam sistem tenaga dibutuhkan untuk menyalurkan listrik dari pusat pembangkit menuju beban, dan umumnya jarak tempuh

dari transmisi adalah mencapai ratusan kilometer, sehingga kerugian daya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\Delta P_t = 3I^2R \quad (2.1)$$

Dimana :

ΔP_t = kerugian daya transmisi (Watt)

R = tahanan kawat/konduktor transmisi perfasa (Ohm)

I = arus jala-jalan transmisi (Ampere)

Arus jala-jala transmisi bolak balik tiga fasa adalah

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V_r \cos \theta} \quad (2.2)$$

Dimana :

P = daya beban pada sisi penerima transmisi (Watt)

V_r = tegangan fasa ke fasa pada sisi penerima transmisi

$\cos \theta$ = faktor daya beban

Jika persamaan (2.2) disubstitusikan ke persamaan (2.1), maka kerugian daya transmisi dapat dinyatakan dengan menjadi

$$\Delta P_t = \frac{P^2 R}{V_r^2 \cos^2 \theta} \quad (2.3)$$

Dari persamaan diatas, menyatakan bahwa cara mengurangi kerugian transmisi adalah dengan cara menaikkan tegangan transmisi, memperkecil tahanan kawat transmisi, dan memperbesar faktor daya beban.

Saluran transmisi merupakan suatu sistem yang komplek yang mempunyai karakteristik yang berubah-ubah secara dinamis sesuai keadaan sistem itu sendiri. Adanya perubahan karakteristik ini dapat menimbulkan masalah jika tidak segera dapat diantisipasi. Dalam hubungannya dengan sistem pengamanan suatu sistem transmisi, adanya perubahan tersebut harus mendapat perhatian yang besar mengingat saluran transmisi memiliki arti yang sangat penting dalam proses penyaluran daya.

2.2 Transformator Tegangan [1]

Transformator tegangan atau *voltage transformer* adalah transformator satu fasa step-down yang mengubah tegangan sistem ke suatu tegangan rendah yang digunakan untuk perlengkapan indikator, alat ukur, rele, dan alat sikronisasi. Hal ini diperlukan atas pertimbangan harga dan bahaya yang ditimbulkan tegangan tinggi bagi operator. Tegangan perlengkapan seperti indikator, meter, dan rele dirancang sama dengan tegangan terminal sekunder transformator tegangan.

Pada transformator tegangan, tegangan sekunder sebanding dengan tegangan primer dan berbeda fasa pada sudutnya yang hampir mendekati nol untuk arah tertentu dari koneksi. Hal ini berarti VT harus sedekat mungkin dengan transformator ideal. Pada transformator ideal, vektor tegangan sekunder berlawanan dan sama dengan vektor tegangan primer ketika dikalikan dengan rasio belitan transformator.

Pada kenyataannya, kesalahan atau rugi-rugi terjadi karena sebagian arus hilang akibat magnetisasi dari inti besi dan karena rugi-rugi pada belitan primer dan sekunder akibat rektansi bocor dan resistansi belitan. Untuk rugi-rugi tegangan, yang terlihat dari tegangan yang kurang dari tegangan pada sisi primer. Terdapat dua jenis transformator tegangan, yaitu transformator tegangan magnetik (induktif) dan transformator tegangan kapasitif.

2.2.1 Transformator Tegangan Magnetik (Induktif)

Prinsip kerja transformator tegangan induktif sama dengan transformator daya. Meskipun demikian, rancangannya berbeda dengan dalam beberapa hal, yaitu :

- a) Kapasitasnya kecil (10 – 150 VA), karena bebannya hanya alat-alat ukur, rele, dan indikator yang konsumsi dayanya kecil.
- b) Galat faktor transformasi dan sudut fasa tegangan primer dengan tegangan sekunder dirancang lebih kecil untuk mengurangi kesalahan pengukuran.
- c) Salah satu terminal sisi tegangan tinggi selalu dihubungkan ke tanah.
- d) Tegangan pengenal sekunder transformator tegangan biasanya adalah 100 V atau $100\sqrt{3}$ Volt.

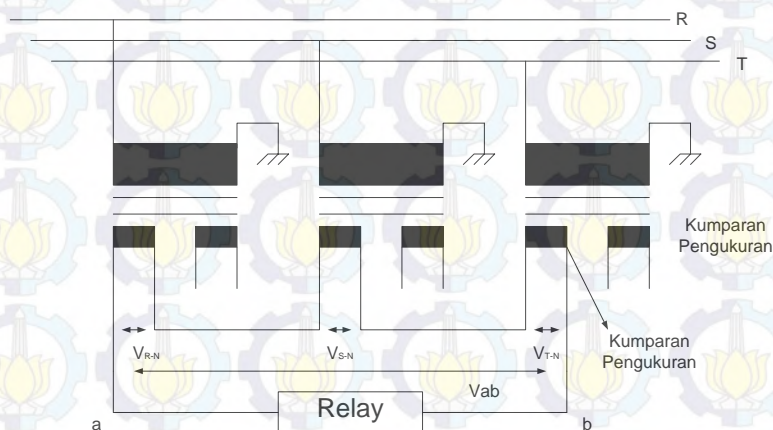
Transformator tegangan yang salah satu terminalnya dihubungkan ke tanah disebut transformator tegangan tunggal, sedangkan transformator tegangan yang kedua terminalnya diisolir dari tanah disebut transformator tegangan kutub ganda.

Oleh karena itu, transformator dua kutub hanya digunakan untuk tegangan pengenalan sampai 30 kV, sedangkan transformator kutub tunggal dipergunakan untuk tegangan yang lebih tinggi.

Jenis transformator tegangan induktif tergantung pada nilai tegangan operasi dan tempat instalasi. Untuk pemakaian pasangan dalam, transformator tegangan biasanya diisolasi dengan resin ekposi, dimana semua belitan dan kadang-kadang termasuk inti besi dibenam dalam bahan isolasi. Untuk operasi pasangan luar, transformator resin ekposi masih dapat dipakai untuk tegangan pengenalan yang tidak terlalu tinggi.

Untuk tegangan yang lebih tinggi digunakan transformator kutub tunggal dengan isolasi minyak-kertas. Rancangan transformator tunggal isolasi minyak-kertas terdiri dari jenis tangki logam dan jenis kerangka isolasi. Pada jenis pertama, badan aktif transformator tegangan dimasukkan dalam bejana baja dan dilengkapi dengan bushing untuk melewati tegangan tinggi ke terminalnya. Pada jenis kedua, badan aktif transformator semua dibungkus dengan porselin, biasanya digunakan untuk tegangan yang lebih tinggi dari 66 kV.

Transformator tegangan kutub tunggal yang dipasang pada jaringan tiga fasa, disamping belitan pengukuran, biasanya dilengkapi lagi dengan belitan tambahan yang digunakan untuk mendeteksi arus gangguan tanah. Pada Gambar 2.2 menunjukkan rangkaian kumparan tambahan trafo kutub tunggal.



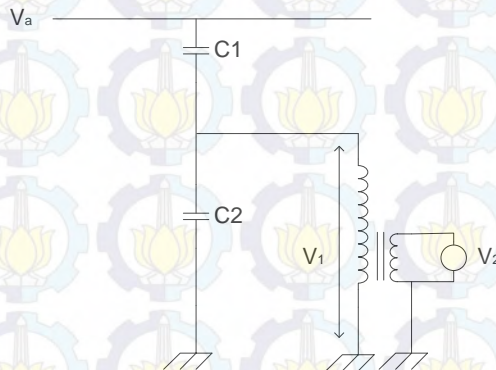
Gambar 2.2 Rangkaian kumparan tambahan trafo kutub tunggal

Selama operasi normal, tidak ada tegangan pada terminal a-b ($V_{ab} = 0$). Jika terjadi gangguan tanah pada salah satu fasa, maka tegangan pada fasa yang lain akan naik sebesar $\sqrt{3}$ dari tegangan semula, sehingga di sisi sekunder kedua transformator dibangkitkan dengan $\sqrt{3}V_n$. Tegangan pada terminal a-b sama dengan resultan tegangan sekunder transformator pada kedua fasa yang naik tegangannya, yang besarnya tiga kali harga tegangan fasa ke netral ($3V_n$). Tegangan ini memberi penguatan atau memicu rele gangguan tanah. Tegangan pengenal belitan gangguan tanah biasanya dipilih sedemikian hingga saat gangguan tanah V_{ab} mencapai harga yang sama dengan tegangan sekunder fasa ke fasa.

2.2.2 Transformator Tegangan Kapasitif

Pada tegangan pengenal yang lebih besar dari 110 kV, karena alasan ekonomis, biasanya digunakan transformator pembagi tegangan kapasitif sebagai pengganti transformator tegangan induktif. Transformator ini akan lebih ekonomis lagi jika digunakan sekaligus untuk keperluan pengukuran tegangan tinggi, sebagai pembawa sinyal komunikasi (*power line carrier*) dan kendali jarak jauh (*remote control*).

Menggunakan pembagi kapasitif tegangan tinggi hanya untuk menurunkan tegangan sekunder ke suatu harga standar sangat tidak ekonomis. Oleh karena itu, pembagi tegangan kapasitif menggunakan sebuah transformator magnetik. Pada gambar 2.3 menunjukkan rangkaian ekuivalen trafo tegangan kapasitif.



Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen trafo tegangan kapasitif

Tegangan yang diukur V_a dalam orde ratusan kilovolt. Oleh karena pembagi tegangan kapasitor, tegangan pada kapasitor C_2 atau

tegangan primer transformator penengah (V_1) diperoleh dalam orde puluhan kilovolt, umumnya 5, 10, 15, dan 20 kV. Kemudian oleh transformator magnetik, tegangan itu diturunkan lagi menjadi tegangan sekunder standar 100 atau $100\sqrt{3}$.

2.3 Fenomena Petir [4]

2.3.1 Pembentukan badai

Persyaratan terbentuknya badai petir adalah keberadaan massa udara panas dengan kelembaban yang cukup tinggi yang ditransportasikan ke ketinggian tertentu. Hal ini terjadi karena beberapa hal antara lain :

1. Permukaan bumi terpanaskan oleh cahaya matahari yang sangat intensif khususnya saat terjadi badai panas menyebabkan lapisan udara dekat permukaan bumi terhangatkan, menjadi ringan dan bergerak ke atas.
2. Saat badai orografis, udara dekat permukaan bumi akan bergerak keatas saat terbentur permukaan bumi vertikal seperti bukit atau gunung.
3. Dll

Gerak vertikal massa udara ini diperkuat oleh dua efek :

1. Udara yang bergerak ke atas mengalami pendinginan dan pada akhirnya mencapai temperatur jenuh uap air. Disini akan terbentuk butiran air dan akhirnya menjadi awan. Pada proses kondensasi ini akan terlepas dan kembali menghangatkan udara. Udara akan semakin tinggi dan akan naik ke ketinggian lebih tinggi.
2. Pada batas 0°C butiran air mulai membeku dan mempunyai efek yang sama seperti kondensasi.

Hal ini akan membentuk aliran udara vertikal dengan kecepatan 100km/jam dan membentuk awan menjulang tinggi dengan diameter 5-10 km pada ketinggian 5-12 km.

Melalui pemisahan muatan elektrostatik karena gesekan dll, butiran air dan partikel es akan termuati awan. Partikel dengan muatan positif pada umumnya lebih ringan daripada yang termuati negatif. Sehingga arus udara vertikal menyebabkan pemisahan muatan dengan luasan yang relatif besar; bagian atas awan badai bermuatan positif sedangkan bagian bawah bermuatan negatif. Pada bagian kaki awan terdapat pusat muatan positif yang kecil yang terjadi karena muatan korona yang berasal dari benda tinggi pada permukaan tanah (seperti tumbuhan, dll) yang terpancar akibat medan permukaan bumi yang

cukup tinggi dan ditransportasikan oleh angin vertikal. Proses ini secara skematik dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Pembentukan sebuah sel badai [4]

2.3.2 Peluahan Petir

Kerapatan peluahan lokal sel badai menunjukkan perbedaan yang besar. Jika secara kebetulan konsentrasi muatan ruang menyebabkan kuat medan beberapa 100kV/m, maka penghantar petir yang bisa disamakan dengan peluahan leader dimulai pada ketidakhomogenan (tetesan air, kristal es). Peluahan ini terbentuk silinder dengan diameter beberapa 10m dan terdiri dari muatan ruang negatif dan inti plasma tipis yang terionisasi tinggi. Peluahan ini tumbuh dengan kecepatan berkisar 300km/s menuju bumi. Dengan semakin mendekatnya peluahan ini, pada permukaan bumi terbentuk penangkap peluahan. Bertemunya peluahan dan penangkap peluahan menyebabkan terbentuknya peluahan utama. Dalam hitungan 1 sampai 100 μ s muatan yang tersimpan akan dilepaskan. Proses ini terlihat sebagai cahaya kilat peluahan petir sesungguhnya. Gambaran proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.5



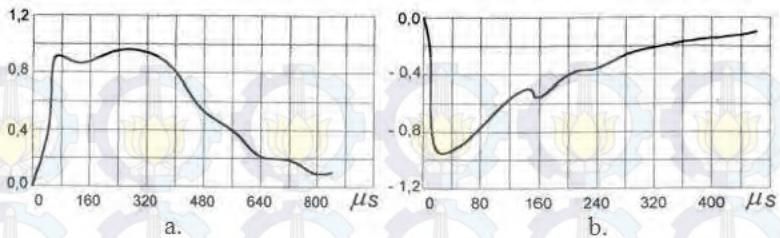
Gambar 2.5 Skematik perkembangan stepped leader dan penangkap peluahan sebuah petir negatif awan-bumi[4].

2.3.3 Jenis-Jenis Petir

Secara umum jenis petir adalah petir yang melibatkan awan-bumi juga petir yang melibatkan awan-awan. Petir awan-awan menyebabkan keseimbangan antara muatan awan positif dan negatif pada pusat awan. Sedangkan petir yang melibatkan awan-bumi ini dapat dibagi menjadi empat jenis yakni petir negatif awan-bumi, petir positif awan-bumi, petir negatif bumi-awan dan petir positif bumi-awan.

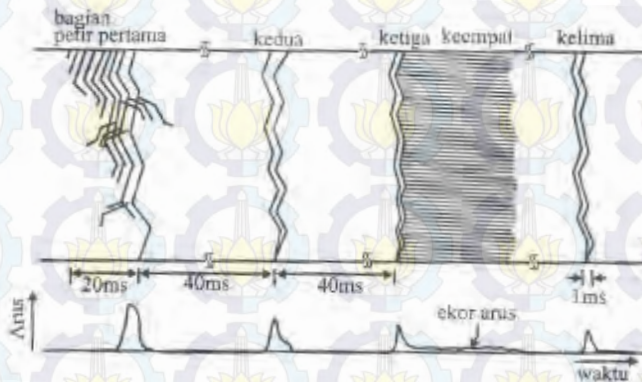
a. Petir Awan-Bumi

Pada jenis petir ini arus imouls peluahan meningkat sampai nilai maksimum 10 kA dalam jangka waktu mikro detik dan mempunyai waktu punggung beberapa puluh mikro detik sebelum akhirnya hilang secara eksponensial. Muatan yang dipindahkan bersamaan dengan arus impuls ini bernilai beberapa ampere detik ($A_s = \text{Ampere second}$). Karakteristik yang sama juga ditunjukkan oleh petir awan-bumi positif. Akan tetapi peluahan yang berasal dari pusat muatan positif bagian atas awan ini menyebabkan arus impuls sepuluh kali lebih panjang dan ini berarti memindahkan muatan lebih besar dibandingkan dengan arus impuls negatif. Sehingga petir ini memberikan efek bahaya yang khusus pada benda tersambar. Contoh tipikal untuk arus impuls positif dan negatif dapat dilihat pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Bentuk tipikal arus impuls (a) positif (b) negatif [4]

Petir awan-bumi juga memiliki sifat khusus yang tidak dijumpai pada petir awan-bumi positif yakni sifat peluahan berantai (*multiple discharge*). Fenomena ini ditunjukkan secara skematik pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Petir awan-bumi negatif berantai [4]

Hal ini terjadi karena setelah jeda 10-100 mili detik, pada jalur pertama yang masih terionisasi terbentuk stepped leader baru yang terdorong ke bumi dari badai awan. Stepped leader yang baru ini bergerak dengan kecepatan lebih tinggi yakni pada kisaran 1/100 kecepatan cahaya karena proses ini terjadi pada jalur yang telah terbentuk yang memiliki tahanan jauh lebih rendah. Hal ini terjadi beberapa puluh kaki berurutan dalam jangka waktu lebih dari 1 detik.

b. Petir Bumi-Awan

Pada benda atau objek yang tinggi seperti menara pemancar atau diatas pucuk bukit dapat terjadi hal yang berlawanan dengan petir awan-bumi. Inisiasi peluahan leader terjadi karena tingginya medan listrik bukan pada awan melainkan akibat distorsi medan sangat ekstrim pada puncak benda tinggi yang menyebabkan stepped leader tergeser ke atas bersama dengan selimut muatan ke awan. Arus mengalir dari benda berada pada kisaran 100 Ampere dalam beberapa 1/10 detik (serupa dengan ekor arus pada petir awan-bumi). Petir bumi-awan dapat diikuti oleh petir awan-bumi pada alur yang dibentuk oleh petir bumi-awan. Mekanisme ini menyebabkan benda tinggi dapat tersambar petir beberapa kali.

2.4 Feroresonansi

2.4.1 Pengertian Feroresonansi[3]

Feroresonansi merupakan fenomena resonansi non-linier yang dapat mempengaruhi jaringan tenaga listrik. Fenomena ini dapat menyebabkan terjadinya level harmonik, *overvoltage*, dan *overcurrent* transient atau *steady state*, yang berbahaya bagi peralatan listrik. Breakdown yang tak dapat dijelaskan dapat terjadi dari gejala yang feroresonansi ini.

Istilah feroresonansi, yang muncul pertama kali tahun 1920, merujuk pada semua fenomena osilasi yang muncul pada jaringan listrik, dimana mengandung induktansi non-linier, kapasitor, sumber tagangan (sinusoidal), dan rugi-rugi yang rendah. Jaringan tenaga listrik dibuat dari induktansi yang bersaturasi, dalam jumlah yang besar (transformator daya, transformator induktif pengukur tegangan, reaktor shunt) dan kapasitor (kabel, saluran panjang, *capacitive voltage transformer*, kapasitor bank). Faktor-faktor inilah yang nantinya akan menyebabkan terjadinya feroresonansi.

Penyebab utama dari fenomena ini adalah munculnya lebih dari satu respon *steady state* yang stabil pada parameter jaringan yang sama. Gejala transient, *lightning overvoltage*, pengisian tenaga transformator atau beban, kemunculan atau penghilangan gangguan, memungkinkan sebagai penyebab feroresonansi. Responnya dapat berubah secara tiba-tiba dari respon *steady state* normal (sinusoidal pada frekuensi yang sama sebagai sumber) ke respon *steady state* feroresonansi yang ditandai dengan level harmonisa dan *overvoltage* yang tinggi, yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik.

Perbedaan utama antara rangkaian feroresonansi dan resonansi linier adalah adanya kemungkinan resonansi pada rentang yang lebar dari nilai parameter, frekuensi dari gelombang tegangan dan arus dapat bervariasi dari frekuensi pada sumber sinusoidal, dan kemunculan dari beberapa respon *steady state* stabil dari nilai parameter dan konfigurasi yang ada.

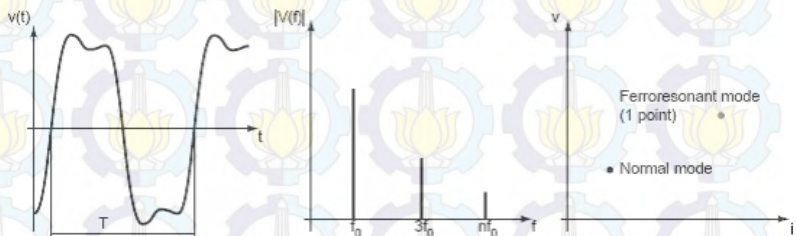
Feroresonansi pada sistem kelistrikan pada umumnya muncul ketika sistem dalam kondisi tidak seimbang. Misalnya pada switching yang menyebabkan sebuah komponen kapasitif terhubung seri dengan impedansi magnetizing transformator. Kondisi ini menyebabkan tegangan lebih yang akan berpengaruh besar pada terjadinya gangguan di transformator, kabel, maupun arrester.

2.4.2 Klasifikasi Feroresonansi[5]

Berdasarkan pada bentuk gelombang yang muncul pada system tenaga, eksperimen yang telah dilakuakn pada model system yang direduksi, serta simulasi numerik, *ferroresonance* dapat dibedakan menjadi 4 (empat) jenis yang berbeda. Keempat jenis ferroresonance tersebut adalah :

1. *Fundamental Mode*

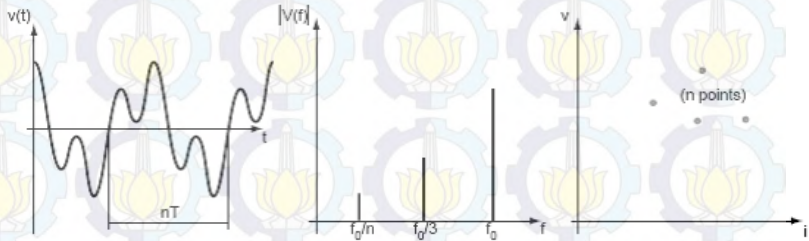
Tegangan dan arus periodik dengan periode T sama dengan periode sistem, dan dapat mengandung berbagai level dari harmonisa. Spektrum sinyal merupakan spektrum diskontinue yang terbuat dari fekuensi fundamental dari sistem dan harmonisanya. Gambar 2.8 merupakan Model Fundamental dari *ferroresonance*.



Gambar 2.8 Model fundamental [4]

2. Subharmonic Mode

Sinyal periodik dengan periode nT yang dapat beberapa kali lebih besar dari periode sumber. Kondisi ini dikenal sebagai subharmonik atau harmonik $1/n$. Kondisi subharmonik ini biasanya terdapat pada orde ganjil. Spektrum yang menunjukkan fundamental sama dengan f_0/n dan harmonisanya. Model ini ditunjukkan pada Gambar 2.9.



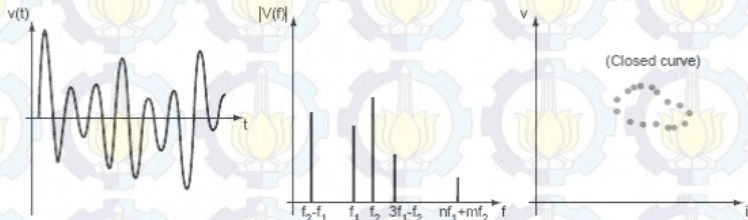
Gambar 2.9 Model subharmonik [4]

3. Quasi-Periodic Mode

Model ini tidak periodik. Spektrum yang didapat merupakan spektrum diskontinu yang frekuensinya terlihat pada rumus :

$$nf_1 + mf_2 \quad (2.9)$$

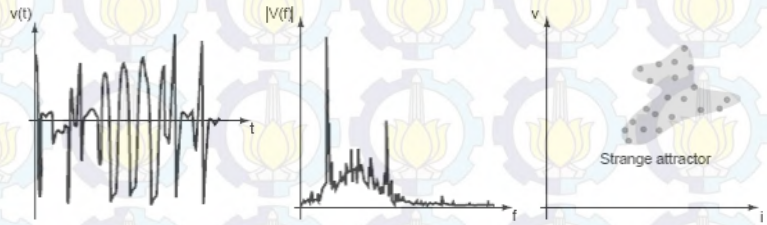
dimana n dan m adalah integer, dan f_1/f_2 adalah bilangan real tidak rasional). Model ini terlihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Model quasi-periodik [4]

4. Chaotic Mode

Spektrum yang terhubung merupakan spektrum yang kontinu karena tidak membatalkan frekuensi apapun. Gambarnya dapat terlihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Model chaotic [4]



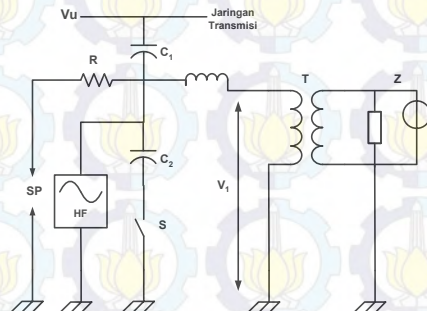
BAB III

PEMODELAN CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER (CVT) DAN PETIR

3.1 *Capacitive Voltage Transformer*[1]

Capacitive Voltage Transformer (CVT) atau transformator tegangan kapasitif merupakan peralatan yang biasanya digunakan pada saluran transmisi. Transformator tegangan ini memerlukan komponen proteksi yang cepat dan juga tepat. Pada tegangan pengenal yang lebih besar dari 110 kV, karena alasan ekonomis, biasanya digunakan transformator pembagi tegangan kapasitif sebagai pengganti transformator tegangan induktif. Transformator ini akan lebih ekonomis lagi jika digunakan sekaligus untuk keperluan pengukuran tegangan tinggi, sebagai pembawa sinyal komunikasi (*power line carrier*) dan kendali jarak jauh (*remote control*). Pembagi tegangan kapasitif ini dapat terlihat pada Gambar 3.1, dengan catatan jika peralatan komunikasi tidak ada, saklar S harus ditutup.

Menggunakan pembagi kapasitif tegangan tinggi hanya untuk menurunkan tegangan sekunder ke suatu harga standar sangat tidak ekonomis. Oleh karena itu, pembagi tegangan kapasitif menggunakan sebuah transformator magnetik. Tegangan yang diukur V_u dalam orde ratusan kilovolt. Oleh karena pembagi tegangan kapasitor, tegangan pada kapasitor C_2 atau tegangan primer transformator penengah (V_1) diperoleh dalam orde puluhan kilovolt, umumnya 5, 10, 15, dan 20 kV. Kemudian oleh transformator magnetik, tegangan itu diturunkan lagi menjadi tegangan sekunder standar 100 atau $100\sqrt{3}$.



Gambar 3.1 *Capacitive Voltage Transformer*

Jika terjadi tegangan lebih pada jaringan transmisi, tegangan pada kapasitor C_2 akan naik dan dapat menimbulkan kerusakan pada kapasitor tersebut. Untuk mencegah kerusakan tersebut, dipasang sela pelindung (SP). Sela pelindung dihubungkan seri dengan resistor R untuk membatasi arus saat sela pelindung bekerja. Disamping itu, suatu impedansi peredam (Z) dibutuhkan untuk mencegah efek feroresonansi.

Jika rugi-rugi pada transformator diabaikan, dan impedansi bebannya tidak terhingga, maka hubungan tegangan pada rangkaian diatas dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{V_u}{V_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = a_c \quad (3.1)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = a_t \quad (3.2)$$

$$\frac{V_u}{V_2} = a_c \times a_t = a_p \quad (3.3)$$

Dimana :

- a_c = faktor pembagi tegangan kapasitor
- = 1,0 jika pembagi kapasitor tidak ada
- a_t = faktor transformasi transformator penengah
- = 1,0 jika faktor penengah tidak ada
- a_p = faktor transformasi sistem pengukuran

Faktor pembagi dan faktor transformasi diatas akan berubah jika rugi-rugi pada transformator penengah dan impedansi beban diperhitungkan. Untuk mengkompensasi perubahan tersebut, maka transformator penengah diserikan dengan induktor L . Jika Z_b adalah impedansi bersama transformator dan beban dilihat dari sis tegangan tinggi, maka hubungan tegangan jaringan dengan tegangan primer transformator penengah menjadi :

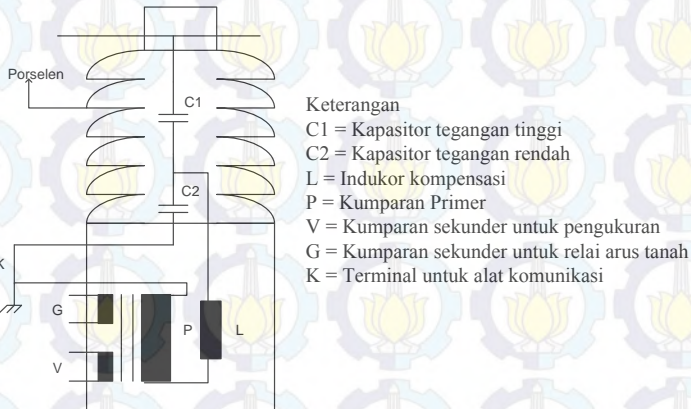
$$\frac{V_u}{V_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} + \frac{1 - \omega^2(C_1 + C_2)}{j\omega C_1 Z_b} \quad (3.4)$$

Bila harga L , C_1 , dan C_2 dipilih sedemikian sehingga memenuhi hubungan daibawah ini :

$$\omega^2 L(C_1 + C_2) = 1 \quad (3.5)$$

maka perbandingan V_u dengan V_1 akan tetap seperti dinyatakan pada persamaan 3.1. Artinya, impedansi beban Z_b tidak berpengaruh terhadap faktor a_c

Karena adanya pembagi kapasitif, maka konstruksi hanya dapat dibuat hanya dalam bentuk transformator kutub tunggal. Belitan gangguan tanah dapat juga disediakan dengan cara yang persis sama seperti transformator magnetik. Rancangan transformator tegangan kapasitif bertegangan tinggi biasanya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Konstruksi trafo tegangan kapasitif

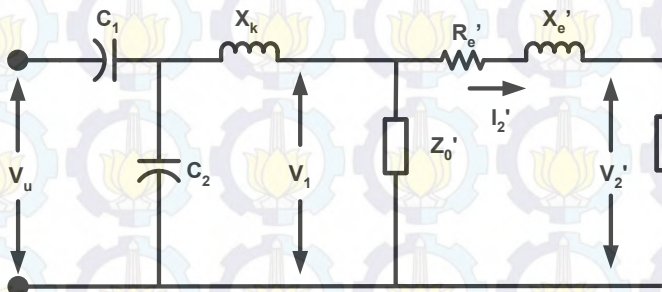
Beberapa kapasitor gulung dielektrik kertas-minyak dihubungkan seri dan disusun didalam kerangka porselen yang ramping. Belitan resonansi dan belitan transformator magnetik intermediet ditempatkan dalam bejana logam. Terminal K dapat dihubungkan ke tanah secara langsung maupun dihubungkan dengan alat komunikasi yang sinyalnya menumpang pada kawat jaringan sistem. Agar efektif sebagai kopling kapasitansi, maka besarnya kapasitansi hubungan seri C_1 dan C_2 harus memiliki nilai minimum 4400 pF. Pada Gambar 3.3 menunjukan contoh *name plate* dari CVT 500 kV.



Gambar 3.3 Contoh name plate CVT 500 kV merk Areva

3.2 Rangkaian Ekivalen

Rangkaian ekivalen CVT dapat terlihat pada Gambar 3.4 dibawah.



Gambar 3.4 Rangkaian ekivalen CVT

Jika V_u dan semua impedansi rangkaian diketahui, maka tegangan V_2' dapat dihitung. Selanjutnya V_2 dapat dihitung dengan persamaan impedansi dan tegangan alat ukur dilihat dari sisi tegangan tinggi, yaitu :

$$Z'_u = a_t^2 Z_u \quad (3.6)$$

$$V'_2 = a_t V_2 \quad (3.7)$$

dimana :

$$a_t = \text{faktor transformasi transformator} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.8)$$

Jika faktor transformasi sistem pengukuran adalah a_p (persamaan 3.3), maka galat rasio CVT adalah :

$$\gamma = \left| \frac{a_p - k_p}{k_p} \right| \times 100\% \quad (3.9)$$

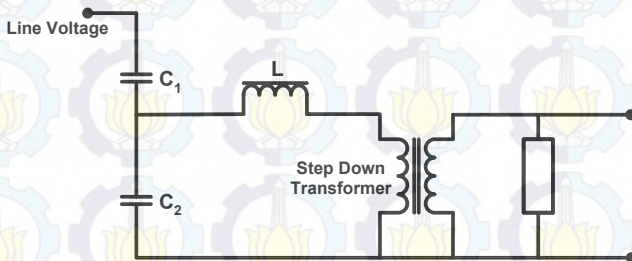
dimana k_p adalah faktor transformasi tegangan aktual sistem pengukuran, dengan persamaan :

$$k_p = \frac{V_u}{V_2} \quad (3.10)$$

3.3 Komponen Utama CVT

Pada umumnya, CVT terdiri atas komponen-komponen utama seperti :

- Kapasitor kopling (C_1 dan C_2)
- Compensating Reactor (L)
- Transformator step-down
- Rangkaian penekan *ferroresonance*



Gambar 3.4 Komponen Utama CVT

Kapasitor kopling memiliki fungsi sebagai pembagi tegangan untuk menurunkan tegangan saluran ke level tegangan intermediet, biasanya 5 sampai 15 kV. Compensating reactor membatalkan reaktansi dari kapasitor kopling pada frekuensi sistem. Proses ini mencegah pergeseran fasa antara tegangan primer dan tegangan sekunder pada frekuensi sistem. Kemudian, tegangan diturunkan lagi dari level intermediet ke level tegangan nominal rele tegangan, biasanya $115/\sqrt{3}$ Volt.

Compensating reactor dan transformator *step-down* memiliki inti besi. Disamping mengakibatkan terjadinya rugi-rugi inti besi, compensating reactor dan transformator step-down dapat menghasilkan *ferroresonance* akibat dari sifat non-linier pada inti besi tersebut. Biasanya CVT dilengkapi dengan rangkaian peredam *ferroresonance*. Rangkaian ini biasanya digunakan pada sisi sekunder pada transformator step-down. Rangkaian ini diperlukan untuk menghindari bahaya dan kerusakan akibat overvoltage karena *ferroresonance*, rangkaian ini dapat memicu tegangan transient pada CVT.

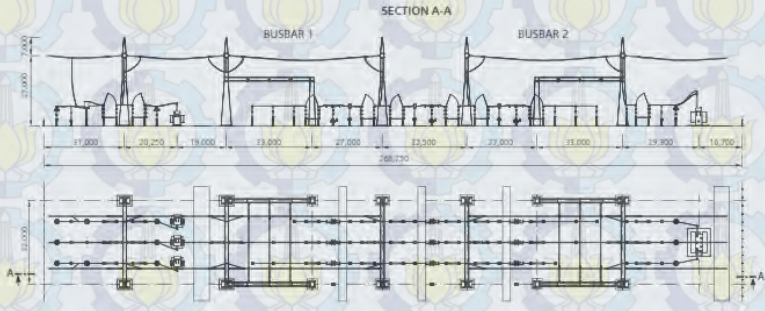
3.4 Pemodelan Petir

Model petir yang digunakan adalah model petir Heidler yang merupakan salah satu komponen di *software* ATP dipasang paralel dengan resistor $400\ \Omega$ [7].

BAB IV

ANALISIS HASIL SIMULASI FERORESONANSI PADA CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMER

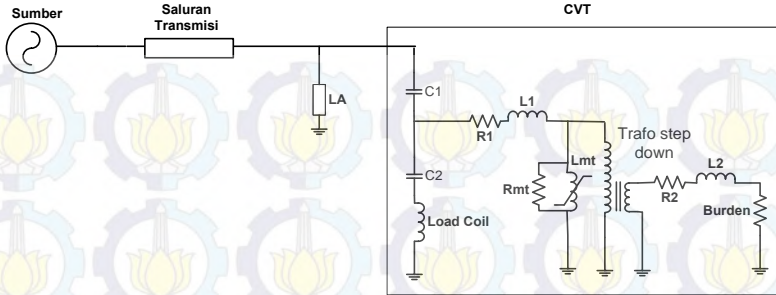
Penelitian ini difokuskan pada CVT yang terletak pada gardu induk 500 kV. Gambar 4.1 menunjukkan layout tipikal gardu induk 500kV. Gardu induk yang memiliki tegangan kerja 220-800 kV menggunakan 1,5 breaker[8]. CVT terletak setelah *lightning arrester* dan sebelum transformator daya. Sehingga pada penelitian ini disimulasikan dengan menggunakan sebuah sumber tegangan disalurkan menggunakan saluran transmisi melewati *lightning arrester* dan berakhir pada CVT.



Gambar 4.1 Layout tipikal gardu induk 500 kV [8]

4.1 Simulasi Feroresonansi

Dampak feroresonansi dianalisis berdasarkan pada hasil simulasi yang telah dilakukan. Permodelan yang digunakan adalah permodelan sistem transmisi yang terhubung dengan *Capacitive Voltage Transformer* (CVT) pada gardu induk. Pada Gambar 4.2 menunjukkan pemodelan rangkaian simulasi feroresonansi .



Gambar 4.2 Rangkaian simulasi

Sumber yang digunakan merupakan sumber arus bolak-balik (AC) dengan tegangan rms *line-line* (V_{L-Lrms}) 500 kV, 50 Hz. Karena objek yang diteliti merupakan satu fasa, maka besar tegangan sumber menggunakan tegangan *line-netral* ($V_{L-Netral}$).

$$V_{L-Nrms} = \frac{V_{L-Lrms}}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

$$V_{L-Nrms} = \frac{500\,000\,V}{\sqrt{3}} = 288675\,V$$

Tegangan puncak *line-netral* ($V_{peak-L-Netral}$) dapat dihitung dengan :

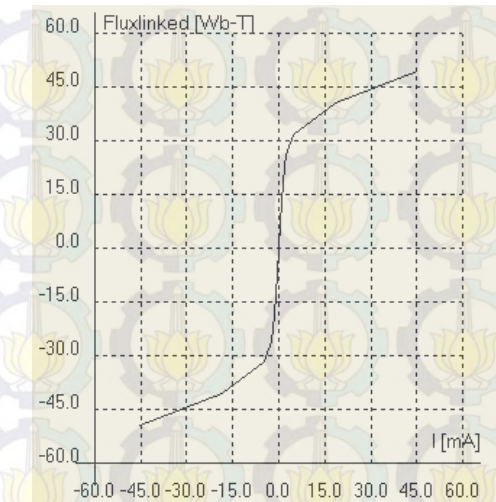
$$V_{L-Npeak} = V_{L-Nrms} \times \sqrt{2} \quad (4.2)$$

$$V_{L-Npeak} = 288675 \times \sqrt{2} = 408248\,V$$

Saluran transmisi yang digunakan memiliki komponen utama berupa komponen resistif, kapasitif dan induktif. Untuk simulasi ini, digunakan *Distributed Transposed Line* dengan parameter tertentu. Saluran transmisi yang digunakan diasumsikan memiliki panjang saluran 5 km. Resistansi saluran 0,00001273 Ohm/m, induktansi saluran memiliki nilai 0,0009337 mH/m, dan kapasitansi saluran sebesar 0,01274 μ F/m.

Pada CVT, digunakan nilai kapasitor pembagi yang diambil dari referensi yang ada. Nilai kapasitor C1 adalah 3300 pF dan C2 adalah 79700 pF. Selain itu, terdapat load coil sebesar 10 mH yang terletak seri dengan kapasitor sesuai dengan referensi yang ada. Transformator yang digunakan adalah transformator *step down* satu fasa yang memiliki nilai saturasi seperti pada Gambar 4.3 dengan

perbandingan tegangan $20/\sqrt{3}$ kV pada sisi primer, dan $100/\sqrt{3}$ Volt pada sisi sekunder.

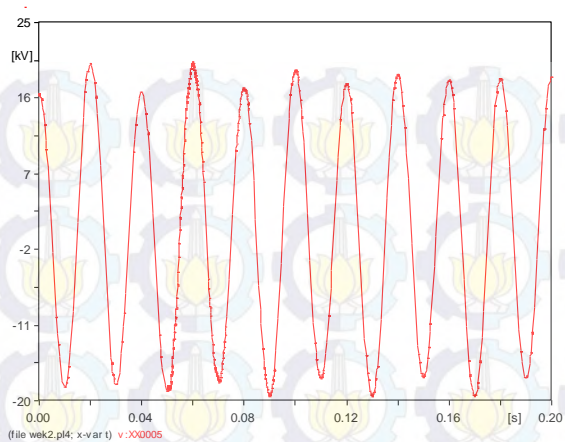


Gambar 4.3 Kurva magnetisasi pada trafo CVT

Pada sisi primer transformator *step down* memiliki nilai resistansi $R1 = 220 \Omega$ dan induktansi $L1 = 1,745$ H. Pada sisi sekunder memiliki nilai resistansi $R2 = 0,04 \Omega$, induktansi $L2 = 0,007$ mH dan nilai resistansi beban = 75Ω . Pada sisi magnetisasi memiliki resistansi $R_{mt} = 6500000 \Omega$ [2].

4.2 Analisa Hasil Simulasi

Untuk memunculkan feroresonansi, dilakukan dengan cara memberi arus impuls pada saluran transmisi. Arus impuls terjadi karena petir yang memiliki bentuk umum $1,2/50 \mu s$ dan memiliki amplitudo 10 kA. Pada sisi sekunder CVT diberi beban resistif dengan resistansi 75Ω . Saat semua parameter dimasukan, hasil simulasi tidak menunjukkan adanya gejala feroresonansi pada CVT. Pada Gambar 4.4 menunjukkan respon tegangan pada primer saat terjadi petir.



Gambar 4.4 Respon tegangan primer saat tersambar petir

Gejala feroresonansi ditandai dengan adanya tegangan lebih dan arus lebih. Dari respon tegangan diatas menunjukan tidak terjadi gejala feroresonansi. Gejala feroresonansi merupakan hasil interaksi antara nilai kapasitor dan inti besi[9]. Sehingga untuk memunculkan dapat dilakukan dengan bervariasi nilai kapasitor dan nilai inti besi. Pada studi ini dilakukan variasi nilai kapasitor pada CVT. Tabel 4.1 menunjukan pengaruh nilai kapasitor pada CVT terhadap feroresonansi pada sisi primer.

Tabel 4.1 Pengaruh nilai kapasitor CVT terhadap feroresonansi pada primer

Kapasitor (pF)		Tegangan (kV)		Arus (mA)		Fero resonansi
C1	C2	Se- belum	Se- sudah	Se- belum	Se- sudah	
3300	79700	20,1	20,2	6,91	6,93	tidak
33000	797000	16,6	19,6	5,69	6,7	tidak
330000	7970000	16,3	43,6	5,6	14,97	ya
3300000	79700000	15,2	38,1	5,22	13,09	ya

Dari Tabel 4.1 diatas menunjukan saat C1 = 330 nF dan C2 = 7970 nF pada CVT sudah terjadi feroresonansi. Sehingga pada studi ini nilai kapasitor pada CVT diganti dengan C1=330 nF dan C2 = 7970 nF.

4.2.1 Keadaan Normal

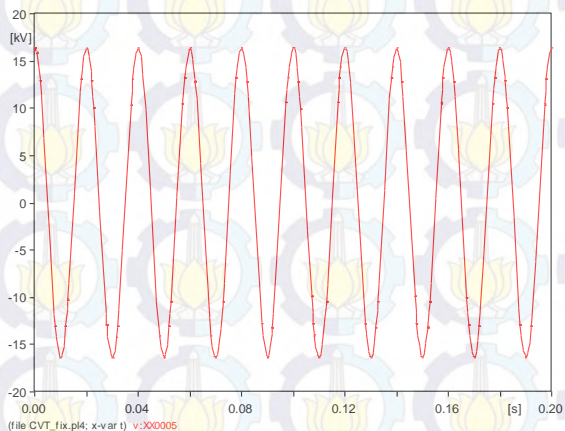
Pada keadaan normal, hasil pengukuran tegangan input pada CVT merupakan tegangan pembagi kapasitor yaitu memiliki tegangan puncak (V_{peak}) 16,3 kV. Sedangkan hasil perhitungan dapat dicari dengan menggunakan persamaan (3.1) :

$$\frac{V_u}{V_1} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (4.3)$$

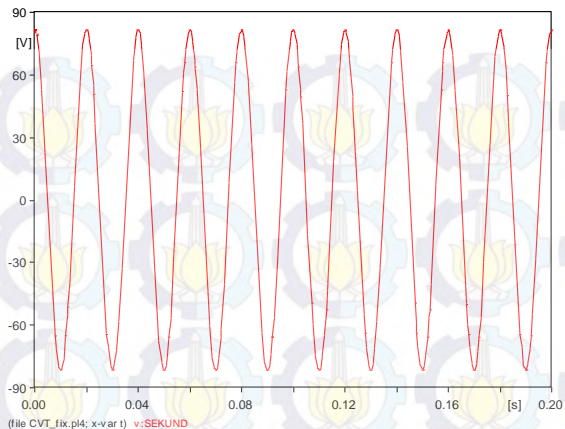
$$V_{inCVT(peak)} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \times V_{system(peak)} \quad (4.4)$$

$$V_{inCVT(peak)} = \frac{330}{330 + 7970} \times 408248 \text{ V} = 16,23 \text{ kV}$$

Hasil hitungan dan pengukuran memiliki nilai sama. Pada Gambar 4.5 menunjukkan tegangan primer CVT pada kondisi normal. Pada Gambar 4.6 menunjukkan bentuk gelombang tegangan sekunder CVT.



Gambar 4.5 Tegangan primer CVT normal



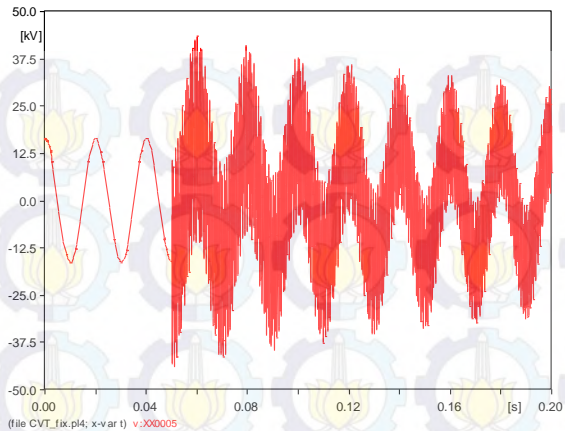
Gambar 4.6 Tegangan sekunder CVT normal

Pada sisi sekunder CVT kondisi normal memiliki tegangan puncak sebesar 81,67 V dengan frekuensi 50 Hz.

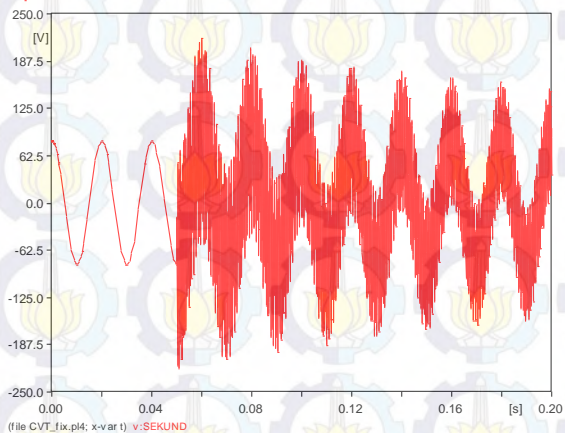
4.2.2 Feroresonansi Akibat Petir

4.2.2.1 Analisa Tegangan Lebih

Untuk memunculkan feroresonansi, dilakukan dengan cara memberi arus impuls pada saluran transmisi. Arus impuls terjadi karena petir yang memiliki bentuk umum $1,2/50 \mu s$ dan memiliki amplitudo 10 kA terjadi pada detik ke 0,05. Pada sisi sekunder CVT diberi beban resistif dengan resistansi 75Ω . Simulasi dijalankan selama 0,2 detik. Pada analisa ini akan diteliti pengaruh panjang gelombang arus impuls terhadap fenomena feroresonansi. Pada Gambar 4.7 menunjukkan respon tegangan pada primer CVT saat saluran transmisi tersambar petir. Gambar 4.8 menunjukkan respon tegangan pada sisi sekunder CVT.



Gambar 4.7 Respon tegangan pada primer ketika saluran transmisi tersambar petir



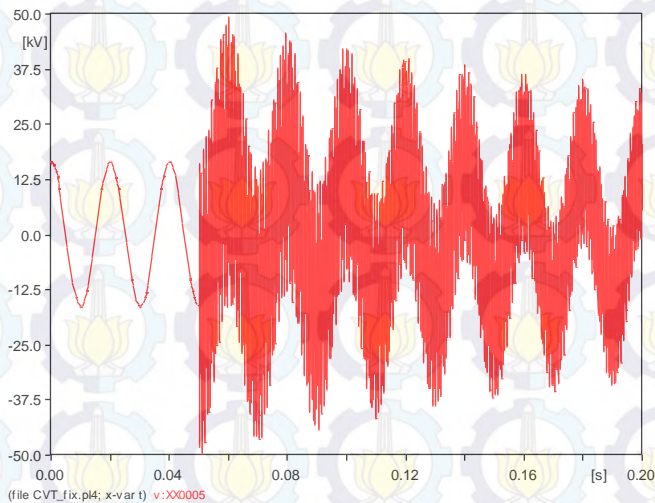
Gambar 4.8 Respon tegangan pada sekunder ketika saluran transmisi tersambar petir

Pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 terlihat bahwa sebelum detik ke 0,05 menunjukkan keadaan normal. Setelah detik ke 0,05 terjadi sambaran petir pada saluran transmisi, respon tegangan menunjukkan lonjakan yang tinggi. Tegangan lebih yang terjadi pada sistem ini terukur memiliki tegangan puncak sebesar 43,6 kV pada sisi primer dan

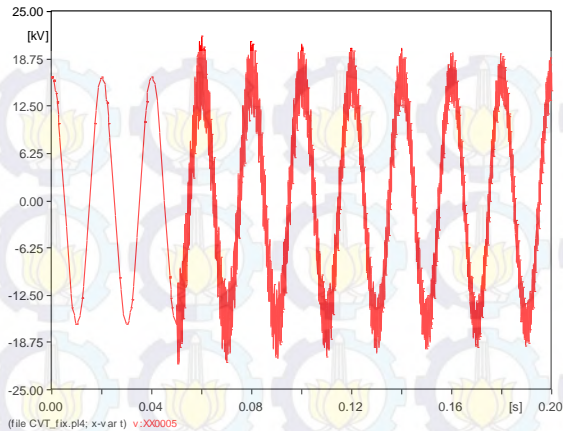
218,1 V pada sisi sekunder. Pada keadaan normal tegangan puncak sisi primer adalah 16,3 kV dan pada sisi sekunder adalah 81,7 V.

A. Studi Amplitudo Impuls Petir

Pada studi ini akan disimulasikan feroresonansi dengan memvariasikan amplitudo impuls petir yang menyambar saluran. Amplitudo impuls petir simulasikan dari 12 kA hingga 2 kA sedangkan untuk durasi impuls petir yang digunakan 1,2/50 μ s. Pada Gambar 4.9 menunjukkan respon tegangan pada sisi primer saat impuls petir diberi amplitudo 12 kA dan Gambar 4.10 menunjukkan respon tegangan pada sisi primer saat impuls petir diberi amplitudo 2 kA.



Gambar 4.9 Respon tegangan primer CVT saat amplitudo impuls petir 12 kA



Gambar 4.10 Respon tegangan primer CVT saat amplitudo impuls petir 2 kA

Saat amplitudo impuls petir diberikan 12 kA, tegangan puncak sisi primer mencapai 49,1 kV. Sedangkan saat amplitudo impuls petir adalah 2 kA, tegangan puncak sisi primer mencapai 21,7 kV. Pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 menunjukkan respon tegangan pada primer dan sekunder saat diberi amplitudo yang berbeda.

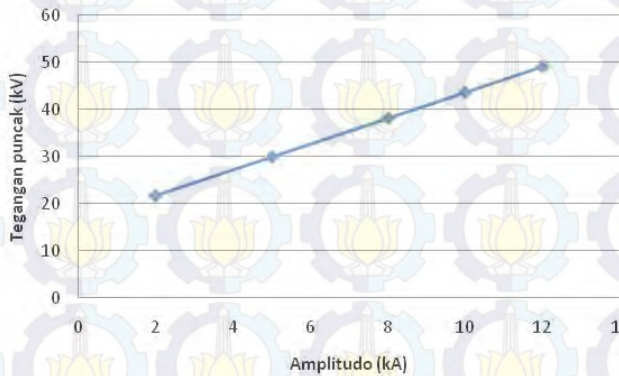
Tabel 4.2 Perbandingan amplitudo impuls petir terhadap tegangan puncak primer

Amplitudo (kA)	Tegangan puncak primer (kV)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
12	16,3	49,1	301,2
10	16,3	43,6	267,5
8	16,3	38,1	233,7
5	16,3	29,9	183,4
2	16,3	21,7	133,1

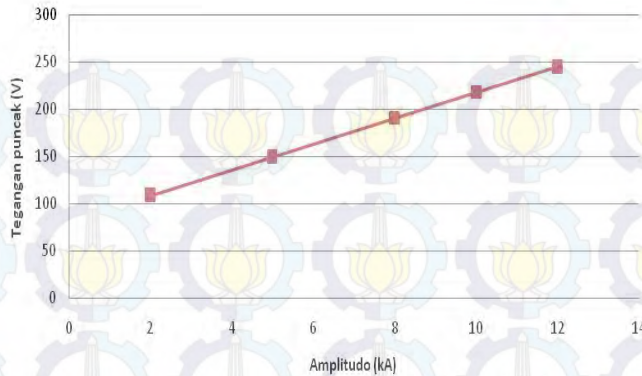
Tabel 4.3 Perbandingan amplitudo impuls petir terhadap tegangan puncak sekunder

Amplitudo (kA)	Tegangan puncak sekunder (V)		Prosentase (%)
	Sebelum	sesudah	
12	81,7	245,3	300,2
10	81,7	218,1	267,0
8	81,7	190,7	233,4
5	81,7	149,7	183,2
2	81,7	108,8	133,2

Dari kedua tabel diatas menunjukan tegangan puncak paling tinggi adalah saat amplitudo impuls petir 12 kA. Tegangan puncak sisi primer mencapai 49,1 kV dan tegangan puncak pada sekunder mencapai 245,3 V. Pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 menunjukan grafik perbandingan amplitudo impuls petir pada primer dan sekunder.



Gambar 4.11 Grafik tegangan puncak terhadap amplitudo impuls petir pada primer

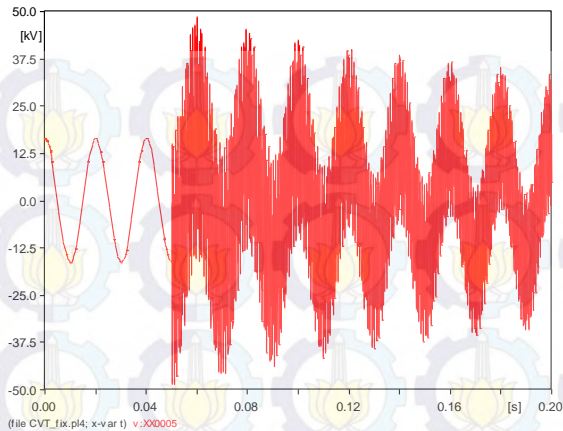


Gambar 4.12 Grafik tegangan puncak terhadap amplitudo impuls petir pada sekunder

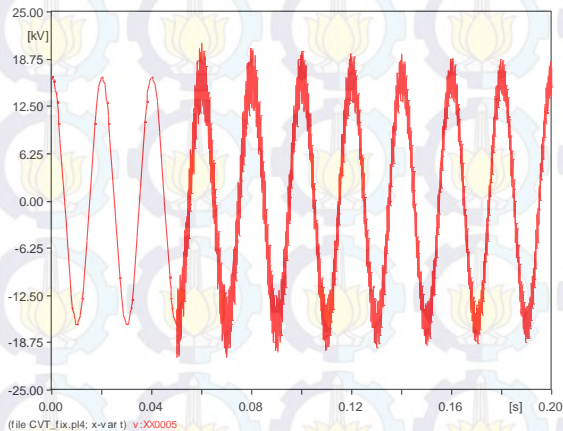
Dari kedua grafik menunjukkan adanya kelinieran antara amplitudo impuls petir terhadap tegangan puncak akibat feroresonansi. Semakin besar amplitudo impuls petir, maka semakin tinggi tegangan puncak feroresonansinya.

B. Studi Durasi Impuls Petir

Pada studi ini disimulasikan feroresonansi dengan memvariasikan durasi impuls petir yang menyambar saluran transmisi. Secara umum durasi impuls petir adalah $1,2/50 \mu\text{s}$ dengan amplitudo 10 kA. Pada simulasi ini dilakukan 2 studi durasi impuls petir yaitu dengan memvariasikan waktu puncak (t_s) dan waktu punggung (t_r). Pada Gambar 4.13 menunjukkan respon tegangan primer saat durasi $1,2/80\mu\text{s}$ dan pada Gambar 4.14 menunjukkan respon tegangan primer saat durasi $1,2/5 \mu\text{s}$.



Gambar 4.13 Respon tegangan pada primer saat durasi impuls petir 1,2/80µs



Gambar 4.14 Respon tegangan pada primer saat durasi impuls petir 1,2/5µs

Saat durasi impuls petir diberikan 1,2/80µs ,tegangan puncak sisi primer mencapai 48,7 kV. Sedangkan saat durasi petir diberikan 1,2/5µs, tegangan puncak sisi primer mencapai 20,8 kV. Pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 menunjukan respon tegangan puncak primer dan sekunder saat durasi waktu punggung impuls petir berbeda.

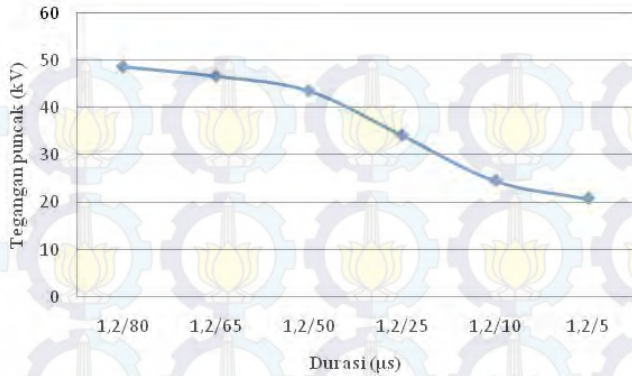
Tabel 4.4 Perbandingan durasi waktu punggung impuls petir terhadap tegangan puncak primer

Gelombang (μs)	Tegangan Puncak Primer (kV)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
1,2/80	16,3	48,7	298,8
1,2/65	16,3	46,7	286,5
1,2/50	16,3	43,6	267,5
1,2/25	16,3	34,2	209,8
1,2/10	16,3	24,6	150,9
1,2/5	16,3	20,8	127,6

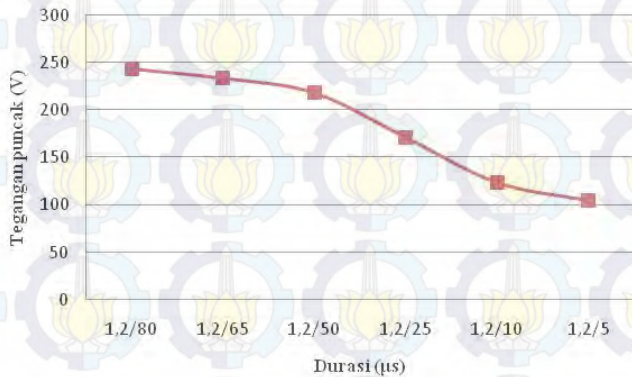
Tabel 4.5 Perbandingan durasi waktu punggung impuls petir terhadap tegangan puncak sekunder

Gelombang (μs)	Tegangan Puncak sekunder (V)		Prosentase (%)
	Sebelum	sesudah	
1,2/80	81,7	243,4	297,9
1,2/65	81,7	233,5	285,8
1,2/50	81,7	218,1	267,0
1,2/25	81,7	170,9	209,2
1,2/10	81,7	123,3	150,9
1,2/5	81,7	104,2	127,5

Dari tabel diatas menunjukan bahwa durasi waktu punggung impuls petir mempengaruhi tegangan puncak feroresonansi. Tegangan puncak paling tinggi adalah saat durasi petir 1,2/80 μs yaitu sebesar 48,7 kV pada sisi primer dan 243,4 V pada sisi sekunder. Pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 menunjukan grafik perbandingan durasi waktu punggung petir terhadap tegangan puncak pada sisi primer dan sisi sekunder



Gambar 4.15 Grafik tegangan puncak terhadap durasi waktu punggung impuls petir pada sisi primer



Gambar 4.16 Grafik tegangan puncak terhadap durasi waktu punggung impuls petir pada sekunder

Dari kedua grafik diatas menunjukan bahwa durasi waktu punggung impuls petir mempengaruhi tegangan puncak feroresonansi. Semakin lebar durasi waktu punggung petir, tegangan puncak akibat feroresonansi juga semakin tinggi.

Studi dilanjutkan dengan memvariasikan durasi waktu muka pada impuls petir. Pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 menunjukan respon tegangan

puncak pada primer dan sekunder pada durasi waktu muka yang berbeda.

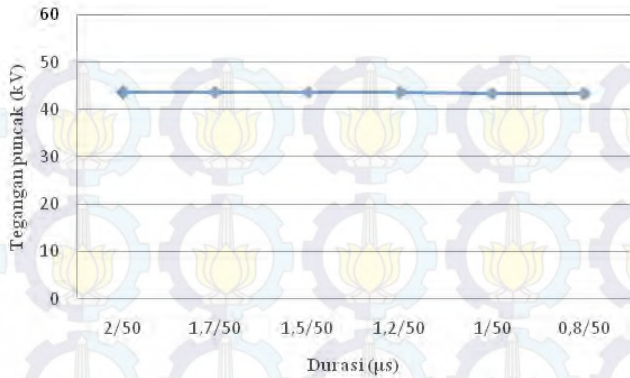
Tabel 4.6 Perbandingan durasi waktu muka impuls petir terhadap tegangan puncak primer

Durasi (μ s)	Tegangan puncak primer (kV)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
2/50	16,3	43,6	267,5
1,7/50	16,3	43,7	268,1
1,5/50	16,3	43,7	268,1
1,2/50	16,3	43,6	267,5
1/50	16,3	43,5	266,9
0,8/50	16,3	43,4	266,3

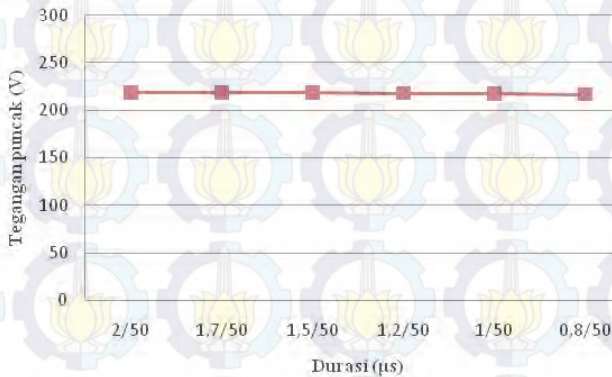
Tabel 4.7 Perbandingan durasi waktu muka impuls petir terhadap tegangan puncak sekunder

Durasi (μ s)	Tegangan puncak sekunder (V)		Prosentase (%)
	Sebelum	sesudah	
2/50	81,7	218,3	267,2
1,7/50	81,7	218,5	267,4
1,5/50	81,7	218,6	267,6
1,2/50	81,7	218,1	267,0
1/50	81,7	217,4	266,1
0,8/50	81,7	216,9	265,5

Dari tabel diatas saat durasi impuls petir 1,7/50 μ s dan 1,5/50 μ s memiliki tegangan puncak primer yang sama yaitu sebesar 43,7 kV. Sedangkan pada sekunder saat durasi 1,5/50 μ s memiliki tegangan puncak paling tinggi yaitu 218,6 V. Pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 menunjukan grafik perbandingan durasi waktu muka impuls petir terhadap tegangan puncak pada sisi primer dan sisi sekunder.



Gambar 4.17 Grafik tegangan puncak terhadap durasi waktu muka impuls petir pada sisi primer

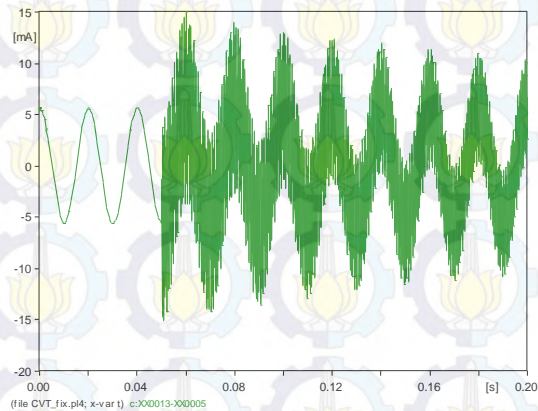


Gambar 4.18 Grafik tegangan puncak terhadap durasi waktu muka impuls petir pada sisi sekunder

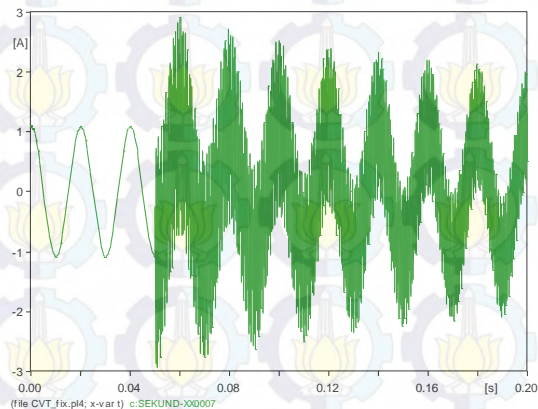
Dari kedua grafik diatas menunjukan bahwa pengaruh durasi waktu muka impuls petir adalah tidak signifikan terhadap tegangan puncak ferresonansi. Dari variasi yang dimasukan untuk durasi waktu muka, nilai tegangan puncak pada primer dan sekunder cenderung tetap.

4.2.2.2 Analisa Arus Lebih

Gejala feroresonansi juga dapat menimbulkan munculnya arus lebih. Gelombang arus yang terjadi juga tidak stabil. Pada studi ini nilai parameter yang tetap yaitu arus impuls terjadi karena petir yang memiliki bentuk umum $1,2/50 \mu\text{s}$ dan memiliki amplitudo 10 kA terjadi pada detik ke 0,05. Pada sisi sekunder CVT diberi beban resistif dengan resistansi 75Ω . Pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 menunjukkan respon arus lebih pada sisi primer dan sekunder CVT.



Gambar 4.19 Respon arus pada primer ketika saluran transmisi tersambar petir

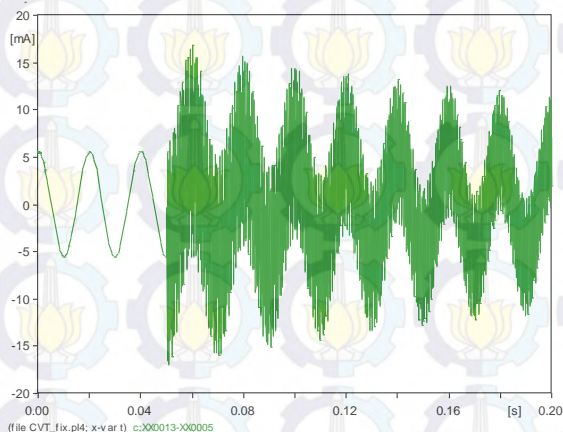


Gambar 4.20 Respon arus pada sekunder ketika saluran transmisi tersambar petir

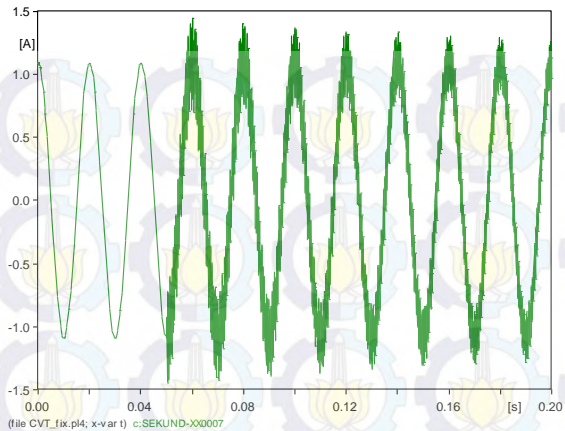
Pada Gambar 4.19 dan 4.20 terlihat bahwa sebelum detik ke 0,05 menunjukkan keadaan normal. Setelah detik ke 0,05 terjadi sambaran petir pada saluran transmisi, respon arus menunjukkan lonjakan yang tinggi. Arus lebih yang terjadi pada sistem ini terukur memiliki arus puncak sebesar 14,9 mA pada sisi primer dan 2,9 A pada sisi sekunder. Pada keadaan normal arus puncak sisi primer adalah 5,6 mA dan pada sisi sekunder adalah 1,08 A.

A. Studi Amplitudo Impuls Petir

Pada studi ini akan disimulasikan feroresonansi dengan memvariasikan amplitudo impuls petir yang menyambar saluran. Amplitudo impuls petir simulasikan dari 12 kA hingga 2 kA sedangkan untuk durasi tetap $1,2/50 \mu\text{s}$. Pada Gambar 4.21 menunjukkan respon arus pada sisi primer saat diberi amplitudo 12 kA dan Gambar 4.22 menunjukkan respon arus pada sisi primer saat diberi amplitudo 2 kA.



Gambar 4.21 Respon arus saat amplitudo impuls petir 12 kA



Gambar 4.22 Respon arus saat amplitudo impuls petir 2 kA

Saat amplitudo impuls petir diberikan 12 kA, arus puncak sisi primer mencapai 16,8 mA. Sedangkan saat amplitudo impuls petir 2 kA, arus puncak sisi primer mencapai 7,47 mA. Pada Tabel 4.8 dan Tabel 4.9 menunjukkan respon arus pada primer dan sekunder saat diberi amplitudo yang berbeda.

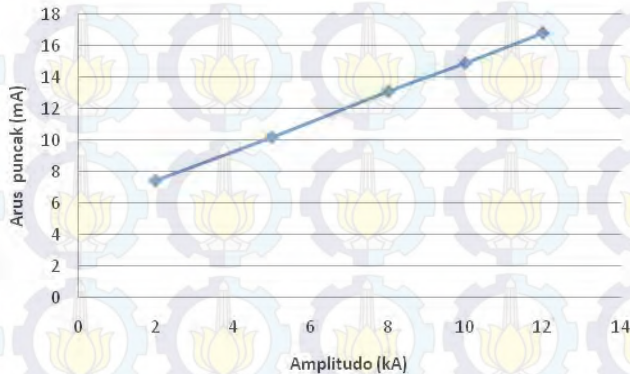
Tabel 4.8 Perbandingan amplitudo impuls petir terhadap arus puncak primer

Amplitudo (kA)	Arus Primer (mA)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
12	5,6	16,8	300,0
10	5,6	14,9	266,1
8	5,6	13,1	233,9
5	5,6	10,2	182,1
2	5,6	7,47	133,4

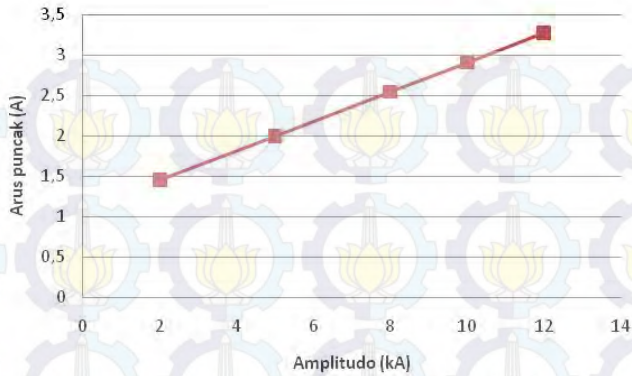
Tabel 4.9 Perbandingan amplitudo impuls petir terhadap arus puncak sekunder

Amplitudo (kA)	Arus sekunder (A)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
12	1,08	3,27	302,8
10	1,08	2,9	268,5
8	1,08	2,54	235,2
5	1,08	1,99	184,3
2	1,08	1,45	134,3

Dari tabel diatas menunjukan bahwa besar amplitudo petir mempengaruhi arus puncak feroresonansi. Arus puncak paling tinggi adalah saat amplitudo 12 kA. Arus puncak pada primer mencapai 16,8 mA dan pada sekunder mencapai 2,27 A. Pada Gambar 4.23 dan Gambar 4.24 menunjukan grafik perbandingan amplitudo impuls petir pada primer dan sekunder.



Gambar 4.23 Grafik arus puncak terhadap amplitudo impuls petir pada primer

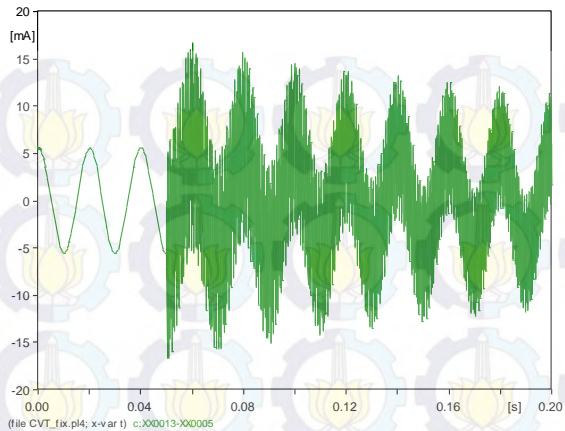


Gambar 4.24 Grafik arus puncak terhadap amplitudo impuls petir pada sekunder

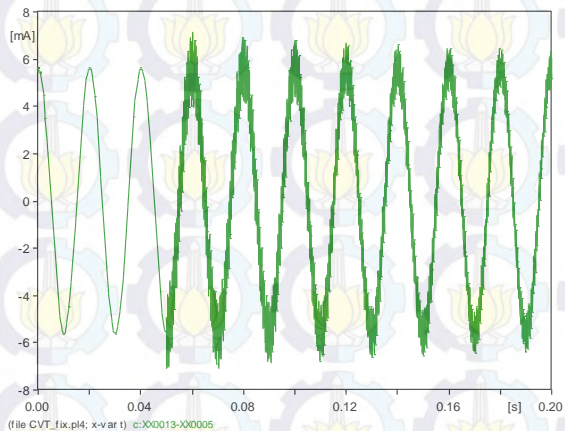
Dari kedua grafik menunjukkan adanya kelinieran antara amplitudo impuls petir terhadap arus puncak akibat feroresonansi. Semakin besar amplitudo impuls petir, maka semakin tinggi arus puncak feroresonansinya.

B. Studi Durasi Impuls Petir

Pada studi ini akan disimulasikan feroresonansi dengan memvariasikan durasi impuls petir yang menyambar saluran. Secara umum durasi impuls petir adalah $1,2/50 \mu s$ dengan amplitudo 10 kA. Pada simulasi ini akan dilakukan 2 studi durasi impuls petir yaitu dengan memvariasikan waktu puncak (t_s) dan waktu punggung (t_r). Pada Gambar 4.25 menunjukkan respon tegangan primer saat durasi $1,2/80 \mu s$ dan pada Gambar 4.26 menunjukkan respon tegangan primer saat durasi $1,2/5 \mu s$.



Gambar 4.25 Respon arus pada primer saat durasi petir 1,2/80 μ s



Gambar 4.26 Respon arus pada primer saat durasi petir 1,2/5 μ s

Saat durasi petir diberikan 1,2/80 μ s, arus puncak sisi primer mencapai 16,7 mA. Sedangkan durasi petir diberikan 1,2/5 μ s, arus puncak sisi primer mencapai 6,2 mA. Pada Tabel 4.10 dan Tabel 4.11 menunjukkan respon tegangan puncak primer dan sekunder pada saat durasi waktu punggng impuls petir berbeda

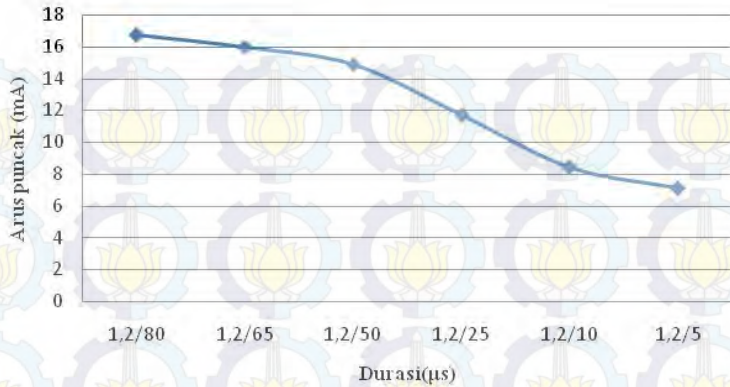
Tabel 4.10 Perbandingan durasi waktu punggung impuls petir terhadap arus puncak primer

Durasi (μ s)	Arus Puncak Primer (mA)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
1,2/80	5,6	16,7	298,2
1,2/65	5,6	16	285,7
1,2/50	5,6	14,9	266,1
1,2/25	5,6	11,7	208,9
1,2/10	5,6	8,4	150,0
1,2/5	5,6	7,1	126,8

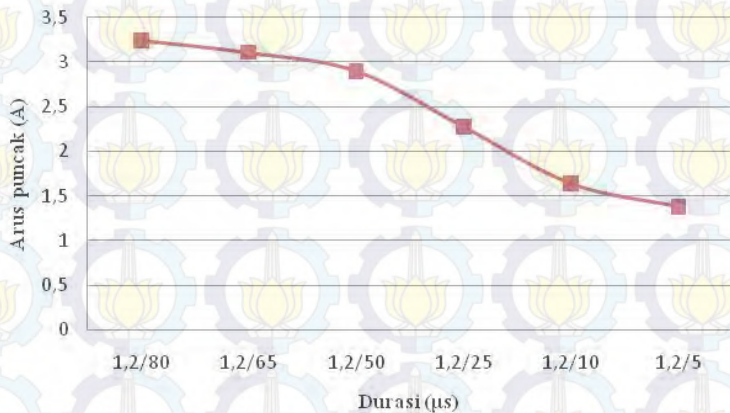
Tabel 4.11 Perbandingan durasi waktu punggung impuls petir terhadap arus puncak sekunder

Durasi (μ s)	Arus Puncak sekunder (A)		Prosentase (%)
	Sebelum	sesudah	
1,2/80	1,08	3,24	300,0
1,2/65	1,08	3,11	288,0
1,2/50	1,08	2,9	268,5
1,2/25	1,08	2,27	210,2
1,2/10	1,08	1,64	151,9
1,2/5	1,08	1,38	127,8

Dari tabel diatas menunjukkan bahwa durasi waktu punggung impuls petir mempengaruhi tegangan puncak feroresonansi. Arus puncak paling tinggi adalah saat durasi petir 1,2/80 μ s yaitu sebesar 16,7 mA pada sisi primer dan 3,24 A pada sisi sekunder. Pada Gambar 4.27 dan Gambar 4.28 menunjukkan grafik perbandingan durasi waktu punggung petir terhadap tegangan puncak pada sisi primer dan sisi sekunder



Gambar 4.27 Grafik arus puncak terhadap durasi waktu punggung impuls petir pada sisi primer



Gambar 2.28 Grafik arus puncak terhadap durasi waktu punggung impuls petir pada sekunder

Dari kedua grafik diatas menunjukan bahwa durasi waktu punggung impuls petir mempengaruhi arus puncak akibat feroresonansi. Semakin lebar durasi petir, tegangan puncak akibat feroresonansi juga semakin tinggi.

Studi dilanjutkan dengan memvariasikan durasi waktu muka pada impuls petir. Pada Tabel 4.12 dan Tabel 4.13 menunjukkan respon arus puncak pada primer dan sekunder saat durasi waktu muka yang berbeda

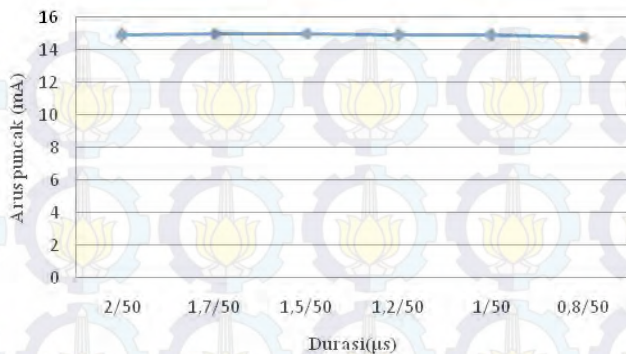
Tabel 4.12 Perbandingan durasi waktu muka impuls petir terhadap arus puncak primer

Durasi (μ s)	Arus puncak primer (mA)		Prosentase (%)
	Sebelum	Sesudah	
2/50	5,6	14,9	266,1
1,7/50	5,6	15	267,9
1,5/50	5,6	15	267,9
1,2/50	5,6	14,9	266,1
1/50	5,6	14,9	266,1
0,8/50	5,6	14,8	264,3

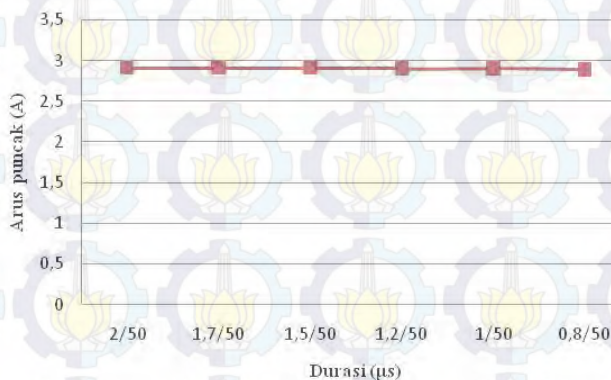
Tabel 4.13 Perbandingan durasi waktu muka impuls petir terhadap arus puncak sekunder

Durasi (μ s)	Arus puncak sekunder (A)		Prosentase (%)
	Sebelum	sesudah	
2/50	1,08	2,91	269,4
1,7/50	1,08	2,91	269,4
1,5/50	1,08	2,91	269,4
1,2/50	1,08	2,9	268,5
1/50	1,08	2,9	268,5
0,8/50	1,08	2,89	267,6

Dari tabel diatas saat durasi impuls petir 2/50 μ s, 1,7/50 μ s dan 1,5/50 μ s memiliki arus puncak primer yang sama yaitu sebesar 15 mA Sedangkan pada sekunder saat durasi 2/50 μ s, 1,7/50 μ s, dan 1,5/50 μ s memiliki arus puncak paling tinggi yaitu 2,91 A. Pada Gambar 4.29 dan Gambar 4.30 menunjukkan grafik perbandingan durasi waktu muka impuls petir terhadap tegangan puncak pada sisi primer dan sisi sekunder.



Gambar 4.29 Grafik arus puncak terhadap durasi waktu muka impuls petir pada sisi primer



Gambar 4.30 Grafik arus puncak terhadap durasi waktu muka impuls petir pada sisi sekunder

Dari kedua grafik diatas menunjukan bahwa pengaruh durasi waktu muka impuls petir terhadap arus puncak adalah tidak signifikan. Dari variasi yang dimasukan untuk durasi waktu muka, nilai arus puncak pada primer dan sekunder cenderung tetap.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan studi yang dilakukan tentang feroresonansi pada CVT akibat petir, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Fenomena feroresonansi akibat sambaran petir dapat menyebabkan tegangan lebih dan arus lebih pada *Capacitive Voltage Transformer* (CVT). Saat impuls petir memiliki amplitudo 10 kA dan memiliki durasi $1,2/50\mu\text{s}$, tegangan lebih pada sisi primer transformator di CVT mencapai 267,5% dari tegangan normal dan pada sisi sekunder transformator di CVT mencapai 267% dari tegangan normal. Amplitudo dan durasi impuls petir dapat mempengaruhi perbedaan nilai tegangan puncak
2. Arus puncak akibat feroresonansi saat impuls petir memiliki amplitudo 10 kA dan memiliki durasi $1,2/50\mu\text{s}$ pada sisi primer tranformator CVT mencapai 266,1% dari arus normal pada sisi primer transformator pada CVT, sedangkan pada sisi sekunder transformator pada CVT arus puncak mencapai 268,5% dari arus normal. Amplitudo dan durasi impuls petir dapat mempengaruhi perbedaan nilai arus puncak.
3. Durasi waktu punggung impuls petir mempengaruhi tegangan puncak dan arus puncak. Saat durasi impuls petir $1,2/80\mu\text{s}$ tegangan puncak sisi primer mencapai 298,8% dari tegangan normal. Sedangkan saat durasi $1,2/5\mu\text{s}$ tegangan puncak sisi primer mencapai 127,6% dari tegangan normal. Sedangkan untuk durasi waktu muka pengaruh terhadap tegangan puncak dan arus puncak tidak terlalu signifikan.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah

1. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut tentang parameter yang ada dilapangan karena setiap parameter yang ada belum tentu sama.
2. Diperlukan suatu usaha untuk mengurangi fenomena feroresonansi, karena fenomena ini memiliki sifat *overvoltage*, *overcurrent* yang dapat merusak peralatan.

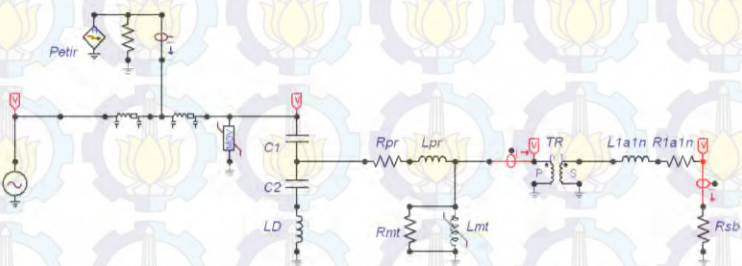
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tobing, Bonggas L., “*Peralatan Tegangan Tinggi*”, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003.
- [2] Bakar, A.H.A. “*Analysis of lighting-caused ferroresonance in Capacitor Voltage Transformer (CVT)*”. Elsevier.2011.Electrical Power and Energy System 33 pp 1536-1541.
- [3] Wiratha, Putu W., “*Analisis fenomena ferroresonance pada Capacitive Voltage Transformer (CVT) akibat pelepasan beban secara mendadak*”, Teknik Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, ITS, Surabaya, 2011.
- [4] Yulistya Negara, I Made., “*Teknik Tegangan Tinggi*”, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2013
- [5] Ferraci, P., “*Ferroresonance*”, Group Schneider: Cahier no 190, pp. 1-28, Maret, 1998
- [6] Ang, Peng Swee., “*Ferroresonance simulation studies of transmission system*”, School of Electrical and Electrical Engineering, University of Manchester, 2010.
- [7] A. Sajjad, G. Ahmad, dan M. Mortza , “*Analysis of Corona Effect on Lightning Performance of HV Overhead Transmission Line Using ATP/EMTP*”, IEEE, 2012
- [8] Willms, Mario., “*Power Enginerring Guide*”, Siemens Aktiengesellschaft Energy Sector, Germany, 2014
- [9] Jacobson, D.A.N., “*Examples of ferroresonance in a high voltage power system*”, IEEE, 1212 Vol. 2, 2003.



LAMPIRAN

A. Rangkaian Simulasi



B. ATP File

BEGIN NEW DATA CASE

C

C Generated by ATPDRAW Desember, Rabu 16, 2015

C A Bonneville Power Administration program

C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2009

C

C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >> Epsiln>

1.E-6 .2

500 1

1 0

C 1

7 8

C

345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012

345678901234567890

/BRANCH

C < n1 >> n2 >>ref1>>ref2>> R >> L >> C >

C < n1 >> n2 >>ref1>>ref2>> R >> A >> B >>Leng><>>0

XX0001XX0002

.33

0

XX0001XX0003

7.97

0

XX0003

10.

0

XX0001XX0004

220.

0

XX0004XX0013

1745.

0

XX0013

6.5E6

0

98 XX0013 0.0 0.0
0

0.0010746 13.509
0.0018382 22.516
0.0025169 25.983
0.0048783 31.522
0.018382 40.528
0.045248 49.535

9999

XX0014XX0006 .007

0 XX0006sekund .04

0 XX0007 75.

0 XX0012 400.

1 XX0010XX0011 .057294.2016 57.33

92 XX0002 5555.

0

3.16E5 -1.

1

0.0012578215269 20.203433531

0.9887106297

0.0018358932102 18.920649837

1.3449367089

0.0042471964948 16.914334208

1.5189873418

0.0011835121505 19.220050355

1.7405063291

0.0039730315095 17.423190053

1.9620253165

0.65607154332 10.787756369

2.1518987342

9999

1 XX0011XX0002 .00637.46685 6.37

/SWITCH

C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP ><

type >

sekundXX0007

MEASURING 1

XX0012XX0011 1

MEASURING 1

XX0013XX0005 1

MEASURING 1

/SOURCE

C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1

>< TSTART >< TSTOP >

14XX0010 408248.1 50.

-1. 100.

14XX0005 1.E-20 50.
-1. 10.
18 200.XX0014
15XX0012-1 1.E4 1.2E-6 5.E-5 10.
.05 1.
/OUTPUT
XX0002sekundXX0005XX0010
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Novandi Wijayanto. Lahir sebagai anak pertama dari tiga bersaudara di Boyolali pada tanggal 17 Februari 1991. Penulis mengawali pendidikan di SD N Kragilan I pada tahun 1997-2003, kemudian melanjutkan pendidikan ke SMP N 2 Boyolali hingga tahun 2006. Setelah lulus dari SMKN 5 Surakarta tahun 2009, Penulis melanjutkan pendidikan Diploma dan memperoleh gelar Ahli madya (A.Md) dari kampus Diploma Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada pada tahun 2012 dengan bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga Listrik. Penulis sempat terjun didunia praktis di PT. Panasonic Gobel Energy Indonesia di Kawasan Gobel Cibitung hingga tahun 2014 sebagai Technical & QA staff. Saat ini penulis sedang melanjutkan pendidikan untuk mendapatkan gelar Strata 1, melalui program Lintas Jalur di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan program studi Sistem Tenaga.

Email: novandiwijayanto@gmail.com